

新 版

机器人技术手册

〔日〕日本机器人学会 编译
宗光华 程君实 等 译



科学出版社

PDG

新版 机器人技术手册

〔日〕日本机器人学会 编
宗光华 程君实 等 译

科学出版社

北京

图字: 01-2005-6303 号

内 容 简 介

本书为第二版,是由日本机器人学会组织编写的大型机器人专业工具书。原著的初版至第二版时隔15年,在这段时间里科技发展突飞猛进,因此修订改版时增加了不少新的内容。本书无论从篇幅还是从专家阵容来看,是一部难得的、具有高学术水平和实用价值的机器人技术大全。

全书共八篇四十三章,书后还附有附录。本书内容涉及基础、元器件、机器人机构及控制、智能技术、系统技术、下一代机器人基础技术,以及机器人在制造业中的应用、机器人应用系统等,可以说囊括了机器人的全部技术内容,荟萃了世界(特别是日本)机器人技术的最新成果和前沿技术。

本书内容新颖、全面系统、资料翔实,可供机器人、机械工程、自动控制、信息技术、工厂自动化以及人工智能、传感技术等领域的科研人员、应用技术人员及高等院校的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

新版机器人技术手册/(日)日本机器人学会编;宗光华,程君实等译.
—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019465-7

I. 新… II. ①日…②宗…③程… III. 机器人技术-手册
IV. TP242-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113610 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:来佳音

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年10月第一次印刷 印张:74

印数:1—3 000 字数:1 866 000

定 价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

新版译者序

从 1954 年美国 Devol 颁布工业机器人专利至今已经半个世纪了。它的成长历程印证了这样的论断:机器人是 20 世纪人类的伟大发明。机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最具有说服力的成就,是当代最高意义的自动化。进入 21 世纪,人们正在愈来愈深切地感受到机器人深入产业、融入生活、渗透到社会各个角落的坚实步伐。

日本是世界上公认的机器人技术发展最快、机器人应用数量最多的国家,有“机器人王国”之称。20 世纪 80 年代,由日本机器人学会牵头,著名机器人学者加藤一郎担任主编,汇集一大批日本国内活跃在机器人技术第一线的从事科学研究、教学和开发的学者专家,编撰了《机器人技术手册》(第一版),由日本 Corona 出版社于 1990 年出版发行。1996 年由科学出版社出版发行了它的中译本。迄今中译本已经渡过了十个春秋,成为中国机器人领域专家学者的得力工具书,陪伴他们见证了中国机器人技术在这一期间的飞速发展。

世纪之交,机器人技术正面临从 R(Robotics)向 RT(Robotics Technology)和 IRT(Information and Robotics Technology)的过渡。简言之,就是机器人的概念、单机、集成系统,将以始料不及的速度迅速地向各个领域渗透,难怪比尔·盖茨预言机器人即将重复个人计算机崛起的道路,成为人们日常生活的一部分,彻底改变这个时代的生活方式。

为了汇总 15 年来机器人技术的发展成果,也为了纪念日本机器人学会成立 20 周年,日本机器人学会于 2000 年着手《新版 机器人技术手册》的编辑工作,历时 5 年,终于在 2005 年 6 月付梓。承蒙科学出版社热心于中国机器人事业,积极与原出版社沟通版权,及时组织国内机器人学界的多位专家学者进行翻译,使新版中译本能够较快问世。

实际上,与第一版相比较,《新版 机器人技术手册》不但全面调整了章节结构,修改补充了内容,而且紧跟机器人技术的进步,增添了不少新的章节,荟萃了当今世界机器人技术领域中各学科专业的最新成果。例如,第 2 篇“元器件”增加了气动驱动器和特殊驱动器的内容;第 3 篇“机器人的机构及控制”以李代数代替原来的 Motor 作为数学工具,增加了并联机构和轮式移动方式,删节了步行机器人的部分内容和特种机器人机构,对自主移动给予更多的关注;第 4 篇“智能技术”和第 5 篇“系统技术”的内容也有大幅度调整,体现出作者在选材方面与时俱进的用心,在视觉、听觉、力觉、触觉等机器人高级智能的信息处理技术,传感器信息融合、行动规划、自主移动等方面作了详细的介绍,增加了开放系统、软伺服、系统设计、分散系统的内容;第 6 篇“新一代机器人基础技术”是全新的一篇,涉及拟人机器人、微机器人、仿生机器人,它们被视为 21 世纪机器人技术的新宠儿;第 7 篇“机器人在制造业中的应用”和第 8 篇“机器人应用系统”更加关注 15 年来机器人应用拓展的新领域,把重点放在系统应用上。

可见,《新版 机器人技术手册》为读者展现了一个新的架构,更具有可读性、参考价值和时代特点,我们有理由相信,这是一本读者值得企盼的最好的工具书之一。

参加本书翻译的有宗光华(新版前言、各篇内容介绍、凡例、附录),张海(第 1 篇),杨

洋(第2篇),程君实(第3篇),卢伯英(第4篇),李祖枢(第5篇第1章~第6章),曹其新(第5篇第7章~第11章),易建强、张立(第6篇),宗光华、唐伯雁(第7篇、第8篇)。宗光华负责译稿的联络协调,并对译稿的全部内容以及存疑词汇进行了审校,正是各位的辛勤努力,才使得这部巨著能在短时间内脱稿。

值此《新版 机器人技术手册》付梓之际,我谨向百忙中拨冗执笔的各位译者,向编辑出版这部巨著的科学出版社的有关编辑,以及 Corona 出版社和原著编辑委员会的各位委员表示诚挚的谢意。

愿本书能够为新世纪中国的机器人技术发展起到推波助澜的作用。

本书内容浩瀚,译者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

宗光华

2007年6月7日

新版前言

从《机器人技术手册》(第一版)出版发行迄今,已经历了十五个春秋。在这期间机器人技术飞速地发展。鉴于此,我们决定对第一版的内容进行全面修订和补充,出版发行《新版 机器人技术手册》。

在1990年出版发行的《机器人技术手册》(第一版)的前言中,已故的编辑委员会主任加藤一郎有如下一段展望:

“柏林墙的打开和德国的统一,预示着20世纪90年代至21世纪初将是国际形势趋向和平的时代;政治形势的缓和,必然带来全球经济的繁荣和发展。可以预料,机器人不仅能在所有的经济领域大显身手,而且还将步入家庭,成为人类的得力工具和助手。因此,处于世界机器人技术发展前沿的日本出版的《机器人技术手册》(第一版)一书,具有极其重要的意义。”

本书第一版由日本机器人学会组织编撰,执笔者均是活跃在机器人技术领域第一线的从事科学研究、教学和开发的专家。书中荟萃了机器人技术各学科专业的最新成果。在当今世界的机器人技术领域中,《机器人技术手册》(第一版)是读者企盼的最好的工具书。

在第一版问世后的十余年间,机器人的发展轨迹完全印证了加藤一郎主任的睿智,拟人机器人、宠物机器人、康复机器人等陆续从预想变为现实。这些成果,除了得益于计算机及其他相关技术的发展之外,更离不开诸多研究人员和工程师长期不懈的追求。当然,《机器人技术手册》(第一版)也起到了推波助澜的作用。

着手《新版 机器人技术手册》编辑工作之初,原本的设想是成立一个修订准备委员会,任务仅仅限于对初版发行后十余年来机器人技术的发展作一些修订。始料未及的是,传感器、驱动器和计算机技术的进步,加快了机器人产业的支柱——工业机器人的迅速普及,拟人机器人、微纳米机器人、医疗手术和康复机器人相继问世。面对这样的现实,我们不得不增补新的内容,扩大修订范围,于是将编辑重点调整为全面修订和补充。为此在2000年开始组建编辑委员会,并决定将本书作为献给日本机器人学会成立20周年的一份贺礼。

与第一版相同,《新版 机器人技术手册》的读者对象不仅是专业人士,还包括更广大的群体。因此,本书不仅收录了机器人专业知识,而且涵盖了相关的基础知识,并顾及今后可能涉及的前沿学科和应用领域。

本书的编撰工作历时5年,我们期待它能够对机器人各个相关领域的研究有所裨益。

值此《新版 机器人技术手册》付诸出版之际,我谨向百忙中拨冗执笔的各位作者、提供照片和图片的各研究机构和企业、以各种形式为我们提供帮助的各位朋友、审校和编辑这部巨作的编辑委员会的成员,以及Corona出版社的各位先生致以深深的谢意。

《新版 机器人技术手册》编辑委员会

主任 增田良介

2005年5月

《新版 机器人技术手册》编辑委员会名单

主 任 增田良介 东海大学

干 事 市川 诚 Engineer Vision RI Inc.

委 员 (以日文五十音为序)

浅间 一 东京大学

柿仓正义 东京电机大学

菅野重树 早稻田大学

高濑国克 电气通信大学

比留川博久 (德)产业技术综合研究所

福田敏男 名古屋大学

三宅德久 Paramount Bed Co., Ltd.

横井一仁 (德)产业技术综合研究所

吉滩 裕 Komatsu Ltd.

米田 完 东京工业大学

执笔者名单

(以日文五十音为序)

浅田 稔 大阪大学

浅野哲夫 北陆先端科学技术大学院大学

浅间 一 东京大学

阿部匡伸 NTT 株式会社

天野久德 (德)消防研究所

新井一彦 鹿岛建设株式会社

新井健生 大阪大学

新井民夫 东京大学

新井史人 名古屋大学

荒川 淳 株式会社日立制作所

井口信洋 早稻田大学名誉教授

池内克史 东京大学

池浦良淳 三重大学

池田喜一 (德)产业技术综合研究所

池田博康 (德)产业技术综合研究所

石黑 浩 大阪大学

石原秀则 香川大学

市川 诚 Engineer Vision RI Inc.

一条久夫 (德)产业技术综合研究所

一濑 昇 早稻田大学

出泽正德 电气通信大学

伊藤宏司 东京工业大学

稻垣克彦 东海大学

井野秀一 东京大学

今井伦太 庆应义塾大学

今泉武男 三菱电机株式会社

林 宪玉 神奈川大学

岩城 敏 NTT 株式会社

植芝俊夫 (德)产业技术综合研究所

上羽贞行 东京工业大学

植村 哲 芝浦机电一体化株式会社

内山研史 (社)林业机械化协会

内山 胜 东北大学

梅田和升 中央大学

梅谷阳二 东京工业大学名誉教授

浦 环 东京大学

远藤隆弘 松下 Factory Solution 株式会社

王 志东 东北大学

大须贺公一 神户大学

太田 顺 东京大学

大筑康生 (财)新产业创造研究机构

大西正纪 Assist Shinko 株式会社

大西良孝 三菱电机株式会社

大野英隆 湘南工科大学

大道武生	名城大学	盐见 弘	(原)中央大学
大矢晃久	筑波大学	重松文治	五洋建设株式会社
小笠原司	奈良先端科学技术大学院大学	实森彰郎	鸟取环境大学
冈田德次	新泻大学	柴田崇德	(德)产业技术综合研究所
长田道春	Denso Wave Inc.	清水 丰	电气通信大学
小野哲雄	公立箱立未来大学	下仓健一郎	NTT 株式会社
小保 透	东京工业大学	下笹 洋一	综合警备保障株式会社
加贺美聪	(德)产业技术综合研究所	下条 诚	电气通信大学
柿仓正义	东京电机大学	白井良明	立命馆大学
加藤 晋	(德)产业技术综合研究所	菅野重树	早稻田大学
加藤直三	大阪大学	杉本浩一	东京工业大学
金子 真	广岛大学	杉本 旭	北九州市立大学
金广文男	(德)产业技术综合研究所	铃木 诚	东北大学
嘉纳秀明	明治大学	铃森康一	冈山大学
加纳雄三	川崎重工业株式会社	须藤宪道	(原)须藤技术士事务所*
神山新一	(原)秋田县立大学	高瀬国克	电气通信大学
川崎晴久	岐阜大学	高桥隆行	福岛大学
川路茂保	熊本大学	泷泽克俊	Funuc Ltd.
河内启二	东京大学	武田诚一	东京海洋大学
川村贞夫	立命馆大学	馆 暉	东京大学
菅野一郎	Funuc Ltd.	立石哲也	(德)物质材料研究机构
木下源一郎	中央大学	田所 谕	东北大学
木下 聪	Funuc Ltd.	谷江和雄	首都大学东京
木本真之	株式会社不二越	长 健次	丰国工业株式会社
久保田直行	首都大学东京	塚越秀行	东京工业大学
桑原 一	横河电机株式会社	津久井勤	东海大学
玄 相晃	东北大学	辻 敏夫	广岛大学
见城尚志	日本电产株式会社	坪内孝司	筑波大学
神德彻雄	(德)产业技术综合研究所	中内 靖	筑波大学
奥水大和	中京大学	中川昭夫	神户学院大学
小菅一弘	东北大学	中泽笃志	大阪大学
小林哲则	早稻田大学	永田和之	(德)产业技术综合研究所
小南哲也	Denso Wave Inc.	中田 毅	东京电机大学
小森谷 清	(德)产业技术综合研究所	中田 亨	(德)产业技术综合研究所
近野 敦	东北大学	永谷圭司	东北大学
酒井久治	东京海洋大学	中野荣二	千葉工业大学
耕原伸介	Funcu Ltd.	中村恭之	和歌山大学
坂根茂幸	中央大学	中村 充	福井县立大学名誉教授
佐久间一郎	东京大学	中村裕一	京都大学
佐藤 要	东京海洋大学名誉教授	中村仁彦	东京大学
佐藤宏介	大阪大学	成冈岑尔	丰田工机株式会社
佐藤贵之	Funcu Ltd.	西口宏美	东海大学
佐藤知正	东京大学	野波健藏	千葉大学
佐野明人	名古屋工业大学	则次俊郎	冈山大学

- | | | | |
|-------|----------------------|---------------|-------------------------|
| 桥本浩一 | 东北大学 | 松野文俊 | 电气通信大学 |
| 桥本秀纪 | 东京大学 | 松原 仁 | 公立箱立未来大学 |
| 桥本 学 | 三菱电机株式会社 | 松本吉央 | 奈良先端科学技术大学院大学 |
| 长谷川健介 | Mitutoyo Corporation | 水川 真 | 芝浦工业大学 |
| 长谷川 勉 | 九州大学 | 美多 勉 | (原)东京工业大学* |
| 畑冈信夫 | 株式会社日立制作所 | 三宅徳久 | Paramount Bed Co., Ltd. |
| 原 功 | (德)产业技术综合研究所 | 三轮敬之 | 早稻田大学 |
| 原田研介 | (德)产业技术综合研究所 | 村田 智 | 东京工业大学 |
| 伴 一训 | Funuc Ltd. | 森 武俊 | 东京大学 |
| 平井成兴 | (德)产业技术综合研究所 | 森 英雄 | Rotta 有限公司 |
| 平冈弘之 | 中央大学 | 森园哲也 | 丰田工业大学 |
| 平田泰久 | 东北大学 | 森田寿郎 | 庆应义塾大学 |
| 比留川博久 | (德)产业技术综合研究所 | 森本正治 | 大阪电气通信大学 |
| 福田敏男 | 名古屋大学 | 安村充弘 | Funuc Ltd. |
| 藤浦建史 | 大阪府立大学 | 藪内秀隆 | 松下电器产业株式会社 |
| 藤江正克 | 早稻田大学 | 藪田哲郎 | 横滨国立大学 |
| 藤冈秀树 | Rion Co., Ltd. | 山口仁一 | 山口机器人研究所 |
| 藤田雅博 | 索尼株式会社 | 山崎信行 | 庆应义塾大学 |
| 古荘纯次 | 大阪大学 | 山田阳滋 | (德)产业技术综合研究所 |
| 古田贵之 | 千叶工业大学 | 山根隆志 | (德)产业技术综合研究所 |
| 细贝英实 | 诹访东京理工大学 | 汤浅秀男 | (原)东京大学* |
| 堀内正彦 | 九州东海大学 | 横小路泰义 | 京都大学 |
| 堀江三喜男 | 东京工业大学 | 横田真一 | 东京工业大学 |
| 本间和男 | (原)株式会社日立制作所 | 吉川恒夫 | 立命馆大学 |
| 本间 大 | Toki Corporation | 吉川荣和 | 京都大学 |
| 前田浩一 | 立命馆大学 | 吉田邦夫 | Adept Japan Co., Ltd. |
| 前山祥一 | 大阪电气通信大学 | 吉本一穗 | 早稻田大学 |
| 增田良介 | 东海大学 | 米田 完 | 东京工业大学 |
| 町田和雄 | 东京大学 | J. J. Kuffner | 美国卡内基梅隆大学 |
| 松井俊浩 | (德)产业技术综合研究所 | | |
| 松永信智 | 熊本大学 | | |

(上列所属单位统计时间截至 2005 年 5 月)

* 已故

各篇内容简介

本书的目的是向读者提供机器人技术的系统知识。第1篇解读理论基础,第2篇讲述机器人的基本零部件和材料,第3篇涉及机构和控制,第4篇阐述基于信息处理和识别的智能技术,第5篇介绍系统综合技术,第6篇是机器人的研究前沿课题,第7篇展现工业机器人的应用,而第8篇则将内容拓展到机器人在非制造领域中的应用。

下面将上述各篇各章的内容加以概括,以便于读者阅读后掌握本书的基本内容,进而选读各自感兴趣的章节。

第1篇 基础

要了解和学习机器人,事先在名词术语、发展历史、基础理论知识等方面做一些准备是必要的。在第1篇中将学习机器人的定义、发展历史,以及与机器人技术有关的数学、力学、控制和计算机科学方面的知识。

第1章 机器人概述

关于“机器人”的定义众说纷纭,很难给出一个统一的表述。在“1.1 机器人”中引用了《机器人技术手册》(1990年第一版)收录的加藤一郎所给出的定义,解释了该定义的主要架构,阐述了逻辑学上的定义方法。“1.2 机器人的历史”介绍从最早出现在公元前希腊神话故事中的机器人概念直至近年来的拟人机器人,追溯了机器人的发展沿革。在“1.3 工业机器人”中,对JIS关于机器人的定义以及工业机器人的历史进行了说明。“1.4 机器人的构成及功能”概要地介绍机器人应该具备的功能,如操作、移动、智能、控制等。

第2章 数学基础

线性代数将操作手抽象为空间姿态和运动的数学问题,是机器人技术不可或缺的数学工具。“2.1 矩阵理论”、“2.2 向量空间”和“2.3 向量分析”介绍矩阵和向量的基础知识,“2.4 坐标变换与齐次变换”讲述在坐标变换中齐次变换的方法,在描述机器人的构件和手部刚体运动时将运用到齐次变换方法。

机器人的各部分构件与共存于同一环境空间中的物体之间的干涉检查,在数学上属于解析几何问题。“2.5 解析几何”介绍描述直线、平面和曲面的基本方法,以及检查多面体、高次曲面之间发生干涉的方法。“2.6 拓扑几何”是一种正确表达机器人状态的数学方法,本节以2自由度的机械臂为例,讨论流形、构形空间等的基本概念,以及对机器人运动路径、速度、距离的处理方法。在“2.7 图论”中,介绍图论在机器人运动路径规划、图像识别等方面的应用以及它的典型问题。

第3章 力学基础

力学是讨论机器人运动学、控制系统的基础。“3.1 质点运动”介绍质点位置、速度、加速度、轨迹的定义,以及在相对运动中对位置、速度、加速度的处理方法。“3.2 刚体运动”解释刚体的概念、自由度、姿势的定义、运动的描述方法,以及刚体平面运动的运

动学。“3.3 刚体力学”讲述静力学、运动的传递特性、动力学,并作为例子,推导出二阶振动的运动方程式。

第4章 控制基础

在“4.1 控制引论”中对反馈控制、前馈控制给予简要介绍和比较,讲述反馈控制系统的基本设计方法和步骤。“4.2 建模”解释状态方程式、传递函数、频率响应,以及稳定性的定义,这些概念都是理解控制对象的特性和制定控制法则的基础。“4.3 反馈控制系统设计”讨论如何借助状态空间法、传递函数法和频率响应法来设计控制系统。“4.4 控制理论简介”论及最优控制、自适应控制、学习控制等话题。

第5章 计算机科学基础

在“5.1 算法设计与分析”中讲述算法的概念和各种算法的设计技巧。“5.2 计算机结构”中交待计算机体系结构的定义以及与之相关的诸多问题。“5.3 计算机语言”解释满足机器人系统的语言应该具有的功能,以及已有的各种语言的特点。在“5.4 实时处理”中讨论如何构建一个系统,以便使它具有实时处理机器人各种信息的基本功能。“5.5 通信”主要介绍数据通信的基础技术。

第2篇 元器件

本篇讲解机器人的各个组成部分,如传感器、驱动器、动力源、机构、材料等,至于控制器,将安排在第5篇进行介绍。

第1章 传感器

用于机器人的传感器有内传感器和外传感器两种。在“1.1 传感器的基本工作原理和分类”中,将分类的方法以及机器人传感器的功能和检测原理给予扼要的说明。“1.2 内传感器”讲述用于位置、角度、速度、角速度、加速度、角加速度、姿态角测量用途的各种传感器及其工作原理。

“1.3 外传感器”又分成若干小节。“1.3.1 视觉传感器”解释生物视觉的构造以及现有的几种视觉传感器。“1.3.2 触觉传感器”讲述人体皮肤神经末梢的功能和几种触觉传感器。“1.3.3 力觉传感器”说明检测力及力矩的原理、力觉传感器的构造,以及力觉传感器的应用实例。“1.3.4 接近觉传感器”揭示在近距离状态下传感器中的敏感元件与对象物体之间是如何产生空间信息的。“1.3.5 距离传感器”涉及超声波距离传感器和光学距离传感器的特点及原理。“1.3.6 听觉、味觉及嗅觉传感器”介绍人体听觉、味觉、嗅觉等传感器官的构造,以及相对应的传感器的工作原理。在“1.3.7 特殊传感器”中包括平衡觉传感器、痛觉传感器、温度传感器、湿度传感器、磁传感器、生物传感器及微型传感器。

第2章 驱动器

“2.1 电动驱动器”介绍步进电机、直流(DC)电机、交流(AC)伺服电机、直接驱动(DD)电机的工作原理和特点。“2.2 液压驱动器”讲述有关液压伺服系统的基本组成和特点、液压伺服阀的构造和特性、液压伺服马达的动特性等内容。“2.3 气动驱动器”告诉读者如何利用气压传动的特性来实现柔性传动,以及气动系统的基本组成。“2.4 特殊驱动器”涉及多种新型驱动器的原理和特点,如小型压电元件、超声波电机、形状记忆合金、橡胶驱动器、静电驱动器、氢气吸留合金驱动器、磁流体驱动器、ER驱动器、高分子

驱动器、光驱动器等。

第3章 动力源

“3.1 固定式机器人的动力源”介绍电动、液压驱动、气动机器人的动力源的组成。在“3.2 移动机器人的动力源”中讨论如何根据机器人的应用领域和形态选用动力源、电缆、电池等。

第4章 机构

“4.1 运动传递机构”讲解产生机器人运动,即改变驱动器的运动速度、方向,或者将运动传递到远处所需要的机械零件的结构、术语、设计的注意事项等。“4.2 关节”介绍机器人里的转动关节、移动关节的结构和设计要领。

第5章 材料

“5.1 机器人材料”从机器人材料的功能角度介绍它的分类、特性等。“5.2 传感器材料”则从传感器材料的角度介绍它的分类、敏感原理和应用等。

第3篇 机器人的机构及控制

第1章 概述

为了能从工程的角度实现生物(人或动物)的机能,机器人必须靠机构和控制将躯体的运动功能具体化,因此需要了解有关机器人机构和控制方面的知识。

第2章 手臂机构和控制

“2.1 手臂机构”涉及手臂的基本构造和种类,讲解与之相关的自由度、关节与自由度的组成、设计时的注意事项,还介绍不同机器人的动作形态、关节的驱动方式、关节构造等内容。

“2.2 手臂运动学”中进行机器人的运动分析,包括给机器人的各个组成部分(构件、传感器等)及作业环境中的对象物定义坐标系,分析各个坐标系之间的位置与姿势关系等内容。“2.2.1 坐标变换的基础”讲解在定义了坐标系之后如何确定两个坐标系中的位置和姿态关系,以及手臂构件坐标系移动(旋转和平移)后的表示方法。“2.2.2 正运动学方程式”在给定关节位置、速度、加速度之后推导包括末端杆件(含末端执行器)在内的机器人手臂任意杆件的位置、姿态、速度、角速度、角加速度等的方法。“2.2.3 雅可比矩阵的计算”介绍如何借助于雅可比矩阵从手臂各个关节的输入速度向量和角速度向量求解末端执行器的输出速度向量和角速度向量。“2.2.4 逆运动学的解法”,即在杆件位置、姿态、速度、角速度、加速度、角加速度给定的条件下求解满足该条件的关节变量的位置、速度、加速度。本节介绍逆运动学的分类,以及在工业机器人手臂分析中的各种逆运动学算法。在“2.2.5 奇异点”中以6关节手臂为例阐述因机构输出自由度的退化,无法实施位置或力控制的奇异点的基本性质。在“2.2.6 其他方法(基于李代数的运动分析)”中,采用现代数学、物理学中的李代数方法,将手臂视为多刚体系统开展运动和力的分析。

“2.3 手臂力学”中,“2.3.1 手臂静力学”给出在静止状态下,当力和力矩作用到手臂末端坐标系原点时求解各关节平衡力和力矩的方法。“2.3.2 运动学与静力学的对偶性”借助于雅可比矩阵,描述在机器人手臂的某个特定位置与姿势下,它的运动学和静力学呈现线性映射(对偶)的关系。“2.3.3 手臂动力学”介绍动力学模型的典型推导

方法,即拉格朗日法和牛顿-欧拉法。“2.3.4 动态模型的基本特性”解释刚性手臂运动方程式所具有的基本特性。“2.3.5 正动力学问题和高效计算”扼要地介绍利用计算机仿真生成的正动力学问题的算法。在“2.3.6 笛卡儿空间的动力学模型”中介绍关节空间的运动方程式被变换成笛卡儿空间的运动方程式。“2.3.7 闭式链机构的动力学”以闭式链机构为对象,介绍运动分析的步骤。最后,“2.3.8 受末端约束的机器人手臂动力学”讲解在机器人末端受到来自环境的约束力和约束力矩的条件下,如何利用雅可比矩阵将之变换成关节驱动力,从而推导运动方程式的方法。

“2.4 手臂的控制”中,“2.4.1 运动控制”以自由空间作业机器人为对象,分为关节伺服(仅仅关注手臂各个关节的运动)、作业坐标伺服(关注手部的运动)以及速度伺服等各种控制方法加以说明。“2.4.2 力控制”是指由于机器人作业时与环境进行接触,发生相互作用力,因此必须赋予其机械柔软性,即必须实施力控制。此节分别讲述在被动柔顺控制、主动柔顺控制、力控制条件下机器人手臂与环境的建模方法,以及其他力控制方法。

“2.5 并联机构”中,并联机构是指多个构件分别具有多个运动副的基座与输出部分并联连接的一类机构。本节介绍它的概念、发展历史、构成,并以空间6自由度(具有6个输出构件)并联机构为对象,举例说明运动分析的方法。

“2.6 柔性臂”中介绍开展柔性臂研究的目的,它是找出抑制柔性臂运动伴生振动的方法,以便达到与高刚性臂同样的控制效果。“2.6.1 柔性臂的力学”首先介绍振动分析、结构设计与控制动态特性分析所采用的建模方法,然后说明1杆件、N杆件柔性臂的建模和动态特性。“2.6.2 柔性臂的控制”的内容包括各种振动抑制的方法以及力控制、协调控制等。

“2.7 控制理论的应用”中,“2.7.1 自适应控制”首先介绍一般的自适应控制方法,以及对机器人手臂这一类用非线性方程式表达的机械系统进行非线性补偿的控制问题,然后举例说明自适应控制在机器人系统中应用的各种实例。“2.7.2 最优控制”首先讲解最优控制问题的定式化和带有状态约束条件的最优控制,然后以机械臂轨迹的时间最短问题为例进行说明。在“2.7.3 学习控制”中讨论算法、学习输入的构成、D型学习控制、P型学习控制等方法。由于关节运动之间相互干涉产生非线性动态特性和非线性负荷,导致物理参数变化和手臂特性出现不确定性的后果,故而在“2.7.4 非线性控制”中,讨论如何有效地实施可变结构控制的问题。

“2.8 手臂机构的设计和评价”中,“2.8.1 描述方法”介绍目前复杂机构(如手臂)有哪些评价方法,进而阐述手臂设计中通常沿用的设计指标和评价指标。“2.8.2 设计步骤”给出设计的流程和作业功能的定义。“2.8.3 单自由度设计”以基本模型为例讲解静态设计和动态设计概念。“2.8.4 多自由度的评价”阐述当系统从单自由度扩展到多自由度时运动学和动力学的处理方法,以及如何借助计算机设计工具进行CAD、CAE和动态特性分析。“2.8.5 非力学条件方面的设计”除了讲解力学设计阶段之外,指出还必须考虑电气设计和配线、工业造形设计等内容。“2.8.6 功能评价”是从作业功能角度去评价手臂机构的优劣。“2.8.7 可靠性评价”则依据FTA方法评价系统的可靠性,以提高驱动器和电气配线的安全可靠性。

第3章 手部机构和控制

在“3.1 手部的分类”中将手部分为机械手部、特殊手部、通用手部和准通用手部四

类。“3.2 特殊末端执行器”介绍 JIS 标准对工具类末端执行器与抓持器的相关规定和相关外围的 JIS 标准、抓持的分类等内容。“3.3 机械手”讲解含 2~3 根手指并能抓持特定工件的手部功能,以及基于手指抓握运动轨迹进行的手部分类方法和结构原理,还有一些特殊的手指机构。

“3.4 手指与对象物接触的力学及运动学”中,“3.4.1 接触形态的分类”认为“手部与对象物之间的抓握和操作理论很重要,因为它既会改变对象物所受到的约束条件,又会影响到接触建模”。在这一认识的基础上本节针对基本接触模型进行了分类。“3.4.2 对象物的力学和运动学”研究手指与对象物接触时在后者重心处力、力矩、速度、角速度发生的变化。“3.4.3 手指的力学及运动学”则求解驱动转矩加载于手指关节后,接触点处发生的力和力矩以及在指关节运动时,接触点处发生的速度和角速度。“3.4.4 点接触的公式以及滑动和滚动(补充说明)”讨论如何以点接触集合的形式来表示手指与对象物接触的状况。

“3.5 抓握系统的构成和分类”中,“3.5.1 抓握系统”把手部的抓握分为握紧、捏紧、夹持等形态。“3.5.2 抓握系统的构成”以握紧为研究对象,研究握紧时在对象物重心处发生的力和力矩以及手指关节的转矩。“3.5.3 抓握系统中的运动约束”从手部与对象物接触时伴生的运动约束着眼,研究抓握系统的可动度、连接度、不确定度、冗余度、对象物的行为、内力的分类等。在“3.6 形封闭(form closure)和力封闭(force closure)”中将手部造成对象物完全失去自由度的约束分成两种情况进行讨论,称其中一种是几何学约束,另一种是接触力约束,在“3.6.3 被动约束和主动约束”中将上述概念重新进行定义,提出被动约束和主动约束的概念。

“3.7 刚性控制”研究在刚性控制下对被抓握物体的操作控制。“3.7.1 基本内容”就刚性控制的原理和单手指刚性控制法则进行研究。“3.7.2 向抓握系统扩展”介绍在多个手指抓握对象物的场合,手指施加给对象物的接触力、力矩及刚性控制等问题。对于对象物来说,要求高速且高精度轨迹跟踪时,动态控制十分有效,因此在“3.8 动态控制”中针对手指与对象物之间既是点接触又有摩擦的情况,研究了 3 自由度手指系统的控制法则。

所谓稳定抓握,是指向对象物施加任意干扰,抓握系统均能产生适当恢复力的抓握状态。“3.9 稳定抓握的力学关系”针对与抓握稳定性有关的摩擦以及考虑摩擦影响的二阶稳定抓握模型进行了讨论。

“3.10 机构设计举例”列举了各种手部设计的事例。

第 4 章 移动机构

本章包括车轮式、履带式、足式以及其他形形色色的移动机构。

“4.1 车轮式移动机构”中,“4.1.1 各种车轮式移动机构”概述了在汽车、工业车辆、移动机器人等领域中得到广泛应用的各种车轮式移动机构的构造和控制方法。在“4.1.2 车轮式移动机构的构成要素”中,按照零部件分门别类地进行功能和应用介绍。“4.1.3 机构”从机构学的角度对车轮式移动机构进行研究,利用等价两轮模型对运动自由度进行说明。“4.1.4 运动学”对机械手和车轮式移动机构运动学的研究方法进行比较,分门别类地推导了车轮式移动机构的正运动学、逆运动学的公式。“4.1.5 力学”着眼于静力学,对汽车和移动机器人作了比较,指出在设计时必须考虑的各种行走阻力问题。“4.1.6 动力学”主要介绍汽车行驶的动力学方法。在“4.1.7 控制”中首先介

绍车轮式移动机器人控制系统的基本组成,然后就导航所涉及的基本问题,如局部路径设计、定位、误差估计和补偿、轨迹控制等进行讨论。

“4.2 履带式移动机构”中,讲解履带可以视为一种无限轨道的行走装置。本章介绍履带式移动机构的基本构造,以及由多条履带组成的各种行走机构。

“4.3 双足移动机器人的机构和控制”中,“4.3.1 双足机器人的机构”以仿人的转动关节型脚机构为对象,介绍它的组成、驱动、脚掌机构、传感器等,进而提及抗衡肌肉型、并联机构型双足机器人。在“4.3.2 双足机器人的力学”中,首先讨论双足机器人的力学特性,将足形移动分为静态步行、动态、跑跳等几种类型,对步行的力学模型(倒立振子模型和质点系模型)、地面反力以及运动学进行研究;然后以两构件双足机器人为例说明建模的步骤。“4.3.3 双足机器人的控制”介绍双足机器人研究的现状,控制理论的发展过程,解释零力矩点和步行稳定性问题,还介绍适宜步行机器人的各种控制方法。

“4.4 多足机器人的机构和控制”中介绍多足机器人,它是四足以上足式机器人的总称。不过在本节中,将“4.3节的双足类人型机器人的以外的足式机器人,包括单足机器人也均归入该节来进行讨论。该节的内容涉及相关的术语、从力学角度对移动方式进行分类、讨论足数目与移动方式的关系、具体应用等。

“4.5 形形色色的移动机构”中,“4.5.1 混合式移动机构”举例说明由车轮式、履带式、足式、躯干式等多种形式移动机构彼此组合构成的混合式移动机构。在“4.5.2 蛇形(超冗余)机构”中,蛇形机器人被称为超冗余体,本节讨论它的特点和构成方式。“4.5.3 壁面吸附式移动机构”介绍一些能够吸附在壁面上移动的机器人的机构和设计要领。“4.5.4 交互对枝形机器人”的作用是借此研究长臂猿手足交替移动的控制算法。

“4.6 水下机器人”中,将水下机器人的移动机构分为拖航式、自航式、复合式、水底行走式、仿生式等几类加以说明。

“4.7 空中机器人”从运动方程式出发对空中机器人的运动和控制进行说明,并分析固定翼型、垂直起降型、浮力型等空中机器人的组成和特点,还讨论了机身设计的要领,最后举出几个空中机器人应用(包括航天)的例子。

第4篇 智能技术

本篇涉及机器人的高级智能,如视觉、听觉、力觉、触觉的信息处理技术,以及传感器信息融合、行动规划、自主移动等内容。

第1章 视觉信息识别

“1.1 机器人视觉”阐述视觉信息输入、信息处理(环境识别和人脑意识的理解)以及机器人视觉系统的组成和功能。“1.2 视觉输入装置”讲解怎样设计视觉输入装置(组成、元器件、图像存取和传感器等),以便在视觉信息输入后得到满意的视觉识别输出。“1.3 二维处理”介绍二维图像处理的步骤和方法,它们属于形状识别和其他识别中的基本技术。“1.4 多维图像处理”讲述将三维信息转换成立体视觉的基本原理和各种方法,以及距离图像处理、运动图像处理等内容。“1.5 主动视觉”研究人眼主动视觉(注视才能看清楚视网膜上映射的图像)在机器人图像处理中的应用和例子。“1.6 实时视觉”中首先将计算机视觉和机器人视觉进行了比较,然后介绍在线运动图像处理(实时图像识别)的发展历史、系统组成及应用事例。“1.7 机器视觉在生产技术中的应用”

回顾了图形处理在产业领域应用的历史,机器视觉在日常生活应用的实例,扼要地介绍“产品生命周期的感性和功能评价系统开发”研究计划的内容。

第2章 语音信息处理

机械和机器人的人机接口的终极目标是实现与人类的交流,语音信息处理是达到这个目标的一项不可或缺的技术。在“2.1 语音识别”中,重点讲解将发出的声音变换成单词或单词序列的步骤。“2.2 语音合成”则研究对人工合成语音最为关键的语音特征、语音合成的各种方法,介绍目前十分流行的“文本-语音合成”技术。“2.3 语音应用系统”讲述语音和语音输入的特点、语音处理的中间件、语音的网络应用、会话机器人中的语音系统等。

第3章 触觉和力觉识别

“3.1 触觉的平面信息识别”的内容包括触觉传感器的基本信息处理、触觉图像的平面信息处理、二维分布载荷的中心位置检测等。“3.2 触觉的立体信息识别”讲解在立体信息识别中经常采用的触觉传感器的种类、三维触觉图像识别方法和应用实例。在“3.3 触觉的物性信息识别”中介绍刚开始应用于机器人技术中的接触性知觉(由皮肤感觉感受器、肌肉感觉感受器相互融合产生的感觉)技术,以及物性信息识别技术的应用实例。“3.4 触觉的抓握信息识别”研究人手抓握与机器人手抓握的关系。“3.5 力觉信息识别”讲解借助六维力觉传感器检测接触信息的方法,以及多指手抓取物体的位置姿势辨识方法。

第4章 传感器高级应用

在本章中,位于系统中的传感器信息被反馈回来控制机器人的行动,因此本章的内容重点涉及传感系统的智能技术和信息处理技术。

“4.1 传感器融合”研究了将多个传感器组合起来使用,实现单一传感器无法达到的功能和特性的途径。组合的方法有复合、综合、融合、联合等几种。在本节中还介绍了一些信号处理、统计处理,以及人工智能、知识工程方面的算法和实例。

行动理解是指将人或机器人的行动分解到它自身能够识别的水平。在“4.2 行为理解”中,对机器人的这种功能进行分析,划分识别的过程,再考察几个实际的例子。

“4.3 视觉反馈控制”解释了视觉传感器信息参与机器人反馈控制的方法,以及它与传统视觉信息识别的区别,分别就静态视觉反馈控制和动态视觉反馈控制加以解释。

“4.4 触觉反馈控制”利用触觉传感器参与机器人控制能够提高机器人手臂操作的灵活性,本节列举了几个例子并加以说明。

“4.5 力觉反馈控制”通过六维力传感器检测机器人与对象物的接触点和接触力,以“接触点检测算法”和对对象物形状探索为例说明控制的方法。

第5章 规划

“5.1 符号处理与推理”介绍人工智能研究的历史、启发式研究的特点、人工智能中“问题解决”的各种方法以及“框架问题”。

在心理学领域中,学习是指“特定条件下的先验经验对个体在后期相同(或类似)条件下采取的行动(或可能的行动)的影响”。“5.2 学习”将上述“个体”替换成机器人,讨论了机器人学习的各种设计方法。

所谓软算法是指在环境信息不确实或模糊的条件下如何针对大规模问题或复杂问

题进行模糊的信息处理。“5.3 软计算”讲述适合机器人技术应用的模糊理论、神经元演算等算法。

“5.4 算法理论的行动规划”介绍面对机械手或移动机器人路径探索问题时,如何以算法复杂程度的理论评价为重点来评价行动规划。为此,本节对路标法和单元分解法进行了说明。

“5.5 试探的行动规划”讲解了处理机械手边躲避障碍物边向目标行进的行动规划方法。虽然该规划方法无法保证一定能够找到解,但在大多数情况下却能在有限的时间内解决实际问题。

在“5.6 作业规划与偏差校正”中,除了介绍机器人自主生成作业规划的各种方法外,还介绍机器人从躲避障碍物状态上恢复到正常状态时如何软纠正误差的问题。

第6章 自主移动

机器人在自主移动的过程中必须不断识别自己所处的位置。“6.1 自身位置的识别”给出机器人利用各种传感器信息融合手段估计自己所处位置的方法。在“6.2 自主移动环境模型”中,对机器人朝目的地自主行进时导航的方法,特别是关于根据事先给定的环境信息移动的“基于模型的搜索方法”进行了说明。“6.3 室内导航”涉及移动机器人路径规划的内容,对基于模型导航的各种方法和研究的趋势作了说明。“6.4 室外导航”主要讲解机器人沿人行道移动时对涉及的各种室外环境的认知功能,给出引导视觉障碍者行走的视觉引导型移动机器人的例子。“6.5 水上导航”介绍了船舶航行所采用的导航方法。

第5篇 系统技术

有了第1篇到第4篇的基础,从本篇开始介绍构建机器人系统所必需的技术。

第1章 机械人系统

“1.1 机器人系统的构成”以工业机器人为例,介绍机器人和周边设备的组成。在“1.2 作业示教方法”讲解了作业示教方法的基本分类、示教信息的基本处理方法。

第2章 机器人的建模与标定

“2.1 机器人的建模”讲述了采用前馈补偿器提高机械手控制程序可移植性的方法,以及解决力控制和阻抗控制稳定性的运动模型化理论,还有在已知机构参数的条件下求解基底参数的方法。“2.2 机器人的标定”介绍了根据修正的D-H法的标定(校正)算法,在机构参数已知的条件下让机械手作适当运动以实现基底参数辨识的方法,其中包括同时估计法、逐次估计法和混合估计法。

第3章 机器人控制器

“3.1 控制器”对机器人控制系统的功能和它的分层结构,以及工业机器人控制器的基本情况进行说明。“3.2 软伺服”中广义地讲解在伺服控制中为了达到目标值所采用的闭环控制,对机器人软伺服控制的概念加以说明。在“3.3 开放式控制器”中,介绍机器人控制系统的分层结构,以及开放式接口的概念。在“3.4 PC控制器”中,介绍在网络环境下将多台PC机分别对应机器人各个控制系统的系统构建方法。在“3.5 遥控脑”中,介绍如何利用网络环境实现更高级的机器人控制。

第4章 机器人编程

在“4.1 机器人编程的种类与特点”中,介绍机器人编程的定义和必要的信息,编程的种类、语言内部的处理顺序,以及正在研究中的有关机器人语言知识处理的内容。“4.2 机器人语言的功能”以机械手中使用的机器人语言为重点讲解机器人语言具有的功能,以及如何与图像处理装置等周边技术组合起来实现高级应用。在“4.3 示教与编程”中涉及运动捕获器示教、满足不同作业要求的传感器反馈示教,以及移动机器人的编程等内容。

第5章 机器人仿真

相应于机器人系统的复杂性,“5.1 概述”将仿真技术按照开发阶段、使用阶段等不同阶段对仿真的功能、用途、分类加以介绍。“5.2 支持机器人设计的仿真技术”中的“5.2.1 机器人动力学系统的运动分析仿真”通过对复杂机器人系统运动的力学分析,重点介绍正动力学的各种计算方法。“5.2.2 控制系统的仿真”给出两个事例:一个是机器人控制系统通常的设计步骤;另一个是机械手手部运动控制系统的设计。“5.3 数学公式处理与仿真”讲解以数学公式处理为工具展开机器人分析的历史,机器人数学公式处理系统的功能,利用 Gröbner 基底如何求解逆运动学,以及基底参数的解析算法问题。“5.4 模型与图形学”涉及三维形状表现方法、实体模型的处理方法、三维图形方法,并以机器人动作规划中的障碍物干涉检测为例说明建模和图形方法在机器人设计中的应用。在“5.5 编程仿真技术”中对动作仿真、传感器仿真,以及软件的综合开发环境作了说明。“5.6 各种仿真工具”给出了目前支持机构设计、编程的主流工具。

第6章 操纵型机器人

由人操纵的操纵型机器人适用于那些靠机器人目前的智能水平还不可及的困难作业。在“6.1 操纵型机器人系统的特征”中,概略地介绍操纵型机器人的应用状况、发展历史、操纵方法,以及与之有关的双向控制和单向控制技术。“6.2 操纵型机器人的分类”按照操纵型机器人发展的脉络,介绍各种机器人的类型和操纵的技术。“6.3 操纵型机器人的控制理论”讲解主从系统的建模,在同时实施力和位置两种控制的双向控制条件下的稳定问题,以及在时延通信环境中双向控制的问题。在“6.4 临场感操纵型机器人系统”中介绍临场感的概念,系统的基本构成方法,立体视觉信息、听觉信息、力觉信息的再现方法。“6.5 智能远程作业系统”介绍了当操作侧与作业侧之间存在时延,或者在通信容量有限的条件下如何在操纵型机器人中实现高级处理的方法。

第7章 人机界面

本章主要涉及以操纵型机器人为对象的人机接口。“7.1 人机交互”讲解机器人交互形态的分类、接口的具体例子以及构建的方法。“7.2 虚拟现实与机器人”介绍虚拟(VR)技术的历史和技术发展动态,以及 VR 模型介入型远程操纵系统的例子。“7.3 多模态界面”介绍多种(语音、图像等)输入模式组合的用户接口以及它的支撑技术。“7.4 手势界面”说明人际交流中手势的特殊功能和分类,以及它在机器人人机接口方面的应用研究概况。“7.5 泛在自主体界面”中首先介绍泛在自主体的概念,然后讲解从识别人的活动开始起步的泛在接口的各种知识。

第8章 机器人与通信系统

本章的 8.1~8.6 节概括地介绍与各种通信接口、通信方式的分层结构和协议、无线

通信技术、LAN 的规格标准、WAN 的概念、互联网通信安全等有关的技术问题和内容。在“8.7 内部 LAN”中介绍 FA 通信的规格标准,这个技术的优点在于能节省机器人的配线。“8.8 通信接口系统描述”中说明 PC 机和机器人控制器之间通信接口的标准化问题,这个问题对机床和机器人控制器的开放式网络系统具有重要意义。

第 9 章 机器人系统设计论

“9.1 系统体系结构设计”讲解在设计机器人系统时有关整个系统的体系结构问题和开发的环境。“9.2 结构设计”介绍机器人的各种结构材料、结构设计以及具体的设计事例。“9.3 控制系统设计”讲解集中控制系统和分布控制系统各自的特点以及具体的设计事例。“9.4 通信及信息处理设计”介绍了机器人中的信息流、通信的作用以及有关的问题。

第 10 章 分布系统

“10.1 分布式机器人系统概述”对分散机器人应用领域作了介绍。“10.2 可重构机器人”介绍构形可变的模块化结构机器人。“10.3 多台机器人协调控制”讲述在多个机器人协调作业条件下各种分散协调控制的算法。“10.4 群体机器人系统”对自主分散型机器人群的分类进行说明。在“10.5 分布规划”中对分布规划的结构和群体机器人的动作规划技术进行了说明。“10.6 分布感知”介绍了基于多代理的分散感知,以及利用视觉的分散感知的有关知识。“10.7 环境智能化技术”中包括两个部分的研究内容:一部分是机器人的智能化、自主化;另一部分是环境本身的机器人化。本节以具体事例进行了说明。“10.8 创发机器人学”中阐述根据机器人与环境(包含人)的相互作用,机器人产生新的行动模式,涌现出新的智能的有关问题。

第 11 章 机器人的可靠性、安全性、可维护性以及与人共存性

“11.1 系统可靠性的定义与度量”中把机器人视为产品,解释有关可靠性、可维护性等方面的术语。“11.2 机器人的可靠性”涉及故障分析和防范故障的对策、可靠性设计和评价规范、机器人安全性等内容。“11.3 人为错误”中从认知系统科学出发解释人为错误的基础知识。“11.4 共存系统的安全性”讲解了共存型及协调型机器人在与人接近和接触的条件下如何解决安全性的问题。“11.5 基于共存系统的协调动作和行动”涉及人-机器人共存系统的形态分类及具体事例。“11.6 共存系统亲和性的表现”讲述了与人共存的机器人在亲和性方面的基本指标、测量和评估的方法等内容。

第 6 篇 新一代机器人基础技术

本篇介绍 21 世纪机器人在基础技术方面的研究状况。

第 1 章 拟人机器人

“1.1 拟人机器人的硬件”总结了拟人机器人研究开发的历史。在“1.2 拟人机器人的运动控制与动作规划”中,“1.2.1 步行模式生成器、反馈控制”概述了双足步行机器人根据 ZMP 生成步行模式的方法和以此为依据的反馈控制。“1.2.2 运动规划与全身运动”解释了拟人机器人手到达目标位置的运动规划方法。“1.3 仿人作业”中,“1.3.1 仿人手臂和手”就仿人上肢和手部设计有关的功能分析和结构组成进行讲解。“1.3.2 仿人远程操作”研究了拟人机器人在处于远距离控制条件下,与状态参数的检测和关节的有机控制等相关的命令系统、显示系统、控制系统的内容。“1.4 以拟人机

器人为媒介的认知科学研究”介绍了以拟人机器人为媒介开展对人类认知系统研究的情况和具体事例。

第2章 微机器人学

“2.1 微驱动器”讨论在与通常机械完全不同的尺度数量级下应该注意的微机械尺度效应以及各种微驱动器。“2.2 微传感器”涉及微小的应变仪、加速度传感器、压力传感器等。“2.3 微操作”对处理对象的大小或作业精度在1mm~1nm的微/纳米作业操作及分类进行说明。“2.4 微机器人系统”中指出构建微机器人时的注意事项,并举例加以说明。“2.5 纳米操作”介绍在纳米尺度下操作微小物的研究历史和例子。

第3章 仿生机器人

“3.1 假臂与假腿(四肢的修复)”概述假臂、假腿技术开发的历史,以及开发活动与机械电子学的关系。“3.2 人工心脏”讲解人工心脏的性能要求和关键技术。“3.3 人工中耳(听觉修复)”介绍耳的结构,失聪的类型,人工中耳的功能、原理及结构等内容。“3.4 人工视觉(视觉代偿)”以代替触觉和听觉等的感觉方法为重点讲解各种相关的技术。“3.5 人工关节”介绍了在人工关节置换手术中人工关节的材料和功能,人工关节置换是机器人辅助手术的应用之一。“3.6 人工肌肉”介绍质量轻、输出大的高分子材料线性驱动器,它能够代替传统的电磁马达实现肌肉的收缩功能。

第7篇 机器人在制造业中的应用

机器人发展至今,一直得益于工业机器人应用的普及,因而,机器人领域的工程师和研究人员也需要在加工技术和生产系统方面具备一定的知识。

第1章 工业工程概论

本章从工业工程(以下简称为“IE”)广泛的应用领域中选出生产线规划、设计、管理的有关内容加以讨论。

在“1.1 方法工程”中介绍IE的发展历史和各种方法,引进机器人时应该考虑的因素等内容。“1.2 人机工程学”概述这门学科的历史、研究对象及安全等相关知识。“1.3 制造工序设计”给出对工序设计的基本要求。“1.4 设施的设计”介绍生产线设计的基本方法。“1.5 经济工程学”讲述了在设备设计阶段引进机器人时如何计算经济性和项目规划的方法。“1.6 面向技术人员的定量方法论”则介绍利用典型IE方法针对生产线进行改造的具体事例。

第2章 机器人在制造业中的应用

“2.1 工业机器人总论”概括地介绍工业机器人的大致分类和它的软件。“2.2 通用机械手总论”则以日本机器人工业会的统计资料为依据,对工业机器人的制造和应用领域作了说明。“2.3 AGV”介绍车间现场物流设备之一的AGV(无人搬运车)的分类、控制方法、行走机构、移载方式,以及系统构成等项内容。

第3章 各种作业与机器人

“3.1 物料搬运”针对搬运铸件等各种零件的机器人的控制和特点作了介绍。这类作业是工业机器人重要的应用领域之一。在“3.2 焊接”中概述了与焊接、切断有关的各种原理和设备,讲解了焊接机器人的控制方法。作为典型应用事例,“3.3 喷涂”介绍了汽车车体喷涂、密封材料喷涂作业中的机器人。“3.4 去毛刺”讲解了与去除毛坯毛

刺、铸件毛刺等作业有关的机器人技术的要点。“3.5 装配”中,“3.5.1 普通装配(汽车零部件)”介绍了生产单元的系统构成,根据选用机器人的形式讲解它的特点,最后以发动机点火零件的装配为例加以说明。“3.5.2 插装和表面贴装”的作业针对印制电路板表面装配,重点介绍表面贴装机器人的组成和应用。“3.5.3 螺钉紧固”讲解用于拧紧各种螺钉的螺钉紧固机器人的具体事例。“3.5.4 汽车舥装”一节从繁多的汽车装配作业中挑选出机器人车门装配生产线,以其为例加以说明。在“3.5.5 键合”中针对半导体器件的封装技术,以及机器人在该工序的应用进行了说明。在“3.6 洁净间”中,讲解了半导体生产线和 LED 生产线中使用的洁净机器人和 AGV。“3.7 测定、检查、及试验”介绍了在汽车车体自动检测中应用机器人的事例。对于传统的示教-再现型机器人来说,有些作业示教难度大,花费的示教时间也多,这一点可以借助于引入智能机器人得到改善。“3.8 工业智能机器人”介绍了智能机器人在零件精密配合作业中的应用事例。

第 4 章 机器人与安全

本章讲解生产现场引入机器人时应该针对安全规范、安全守则、具体安全措施所做的考虑,并以服务机器人的安全设计为例加以说明。

第 8 篇 机器人应用系统

机器人在制造业以外的其他领域中的应用有如核能有关领域,随着机器人智能化的潮流,今后它将渗透到社会生活的各个方面。

第 1 章 机器人在非制造业领域中的应用

“1.1 第一产业”中指出,将机器人推广到第一产业,如农业、林业、水产业相当困难,因为它所面临的作业环境过于复杂,不容易结构化。本书概述了在第一产业各个领域机器人应用的典型事例。

建设业虽然和制造业一样均属于第二产业,但是它的作业环境与第一产业一样复杂多变,而且作业对象既庞大又笨重。在“1.2 在建筑业中的应用”中介绍了建筑领域的机器人应该具备的功能和开发的现状,对楼宇自动施工系统作了简述,还对土木工程中已有的各种机器人的例子,自动化、无人化施工机械进行了说明。

第三产业又叫做服务产业,例如商业、供电、供气、供水、运输通信、金融等,种类十分繁多。在“1.3 在第三产业中的应用”中讲解了娱乐机器人、表演娱乐机器人、保安机器人、清扫机器人、带电操作机器人、管道维护机器人等的例子,并就 ITS 相关技术和影视制作中机器人的应用进行了解说。

第 2 章 医疗机器人

从 20 世纪 90 年代开始,医疗机器人的研究得到迅速发展。本章将医疗领域机器人的应用分类成计算机手术和手术导航技术、手术支援机器人等进行解说,并介绍了各种医疗机器人应用的事例。

第 3 章 福利机器人

从机器人问世之初起,机器人相关技术在福利事业中的应用就一直是研究的课题之一。直至今日,在这方面的研究仍然备受关注。在本章除了对该领域的基本问题作扼要的讲解之外,还介绍福利机器人的分类和几个具体的例子。

第4章 机器人在特殊环境及特殊作业中的应用

人类无法从事作业的特殊环境或危险环境是机器人技术的重要应用领域。“4.1 灾害应对机器人”介绍各种消防机器人的例子,对严重灾害场合下灾害应对机器人的应用事例和研发情况加以说明。“4.2 极限环境作业机器人”对极限环境作业,以及“极限作业机器人计划”进行概述,对机器人在核设施中的应用事例作解说。“4.3 海洋机器人(水下机器人)”讲述了水下海底机器人的发展历史和分类,对 ROV、AUV 的结构和应用事例进行了说明。“4.4 空间机器人”介绍了在空间轨道上作业的机器人、行星探测机器人的作业环境,以及这些环境对机器人技术提出的要求。“4.5 探雷/排雷机器人”讲解了排雷技术和探雷机器人的应用事例。

第5章 机器人在研究与教育领域中的应用

本章分成“5.1 机器人的研究”、“5.2 利用机器人开展的研究”、“5.3 机器人在学习、培训中的应用”、“5.4 机器人对科学技术教育的推动作用”等部分,对机器人的研究和教育进行说明。在最后一节“5.5 机器人的研究开发”中介绍了整个机器人的研发形势。

附录

本书在最后附录部分收录了一些参考资料,包括与机器人技术相关的 JIS 标准,工业机器人图形符号,人体四肢的关节可动范围,人体四肢的关节、骨骼、肌肉的名称,与移动机器人有关的建筑基准法,以及 JIS 电气图形符号在重大修订之后新旧标准的简要对照。

增田良介 福田敏男 菅野重树 市川 诚

凡 例

1. 结构及篇、章、节、小节、项的划分

- (1) 本书由 8 篇构成,篇、章、节、小节、项采用混合式编排。
- (2) 附录中收录有与机器人技术相关的 JIS 标准,人体关节可动范围(日本康复医学会、日本整形医学会),人体四肢的关节、骨骼、肌肉的名称,围绕机器人的环境(摘自建筑基准法),新旧电气零件图形符号对比表(JIS C 0617)等数据资料。
- (3) 在各篇中,图表按章编号。
- (4) 在正文内容的末尾均署有执笔者的名字。
- (5) 全书页码采用统排方式。

2. 术 语

(1) 原则上本书采用日本工业标准(JIS)的术语与符号(JIS B 0134-1998、B 0138-1996),《学术用语集 机械工学篇》(日本机械学会),《学术用语集 电气工学篇》(日本电气学会),《学术用语集 测量工学篇》(日本测量与自动化学会),《机器人学术用语集》(日本机器人学会)规定的术语,对于尚未统一的术语,尽量采用广泛使用的标准名词。

在 1997~1999 年,日本对电气图形符号(JIS C 0617)进行了较大的修订。由于正文中的图形符号仍是修订前的图形符号,所以在本书附录中收录了其中重要的修改之处。

(2) 由于各篇作者的观点不尽相同,为尊重其独立性,同样的内容允许采用不同的术语表述。

- (3) 术语中的数字,原则上采用阿拉伯数字表示。
- (4) 英语的缩写词,原则上附注原词的全拼。
- (5) 重要的术语初次出现时,在随后的括号中加注对应的英文名词。

3. 单 位

原则上采用国际单位制(SI),但在引用文献中或约定俗成的场合,也允许有 SI 以外的单位出现。

4. 数学符号、量符号、单位符号及图形符号

- (1) 一般的数学符号、量符号、单位符号及图形符号,原则上采用 JIS 规定的符号。
- (2) 由于机器人技术涉及诸多学科,所以本书也允许各章采用适合自己的符号以及相应的定义。

5. 文 献

- (1) 文献列于各章的末尾,对应章节的编号和章节名也一并列出。
- (2) 引用文献时,在行文右上角的方括号内将该文献的序号标注出来。
- (3) 文献的著录方式如下:

【期刊、论文集】

著作者:题名,刊名,卷号,期号(Vol.,No.)(出版年)页

【图书】

著作者:书名,出版者,(出版年)页

6. 索引

在书末,有关机器人技术名词*按照中文拼音顺序与日文对照形式列出,并提供该术语所在页码。

7. 关于商标

本书涉及的公司名、商品名、产品名等一般均为该公司的商标或者注册商标,在行文中并未标注出 TM 或®的字样。

由于日本政府部门编制调整,2001年4月机械技术研究所和电子技术研究所等被并入独立行政法人的产业技术综合研究所(AIST,简称“产综研”)。类似地,2003年10月宇宙科学研究所(ISAS)、航空技术研究所(NAL)、宇宙开发事业团(NASDA)被统编到独立行政法人的宇宙航空研究开发机构(JAXA)。2004年4月海洋科学研究中心与其他组织合并成独立行政法人的海洋研究开发机构(JAMSTEC)。为了客观地反映研究和实施当时的真实情况,在本书行文和图片中的有些地方仍用原组织名称表述,读者可自行将新旧组织对照阅读。不过,凡用原组织名义发表的图片 and 著作等的版权应该属于相应的新组织,它们被视为是由新组织提供的。

* 中译本采用《自动化学术名词》(全国自然科学名词审定委员会公布)和中华人民共和国国家标准(GB/T12643-90)规定的译名。——译者注

目 录

第 1 篇 基 础

第 1 章 机器人概述

1.1 机器人	3	1.3.1 什么是工业机器人	13
1.1.1 机器人定义	3	1.3.2 工业机器人的历史	13
1.1.2 逻辑学定义	5	1.4 机器人的构成及功能	15
1.2 机器人的历史	6	参考文献	18
1.3 工业机器人	13		

第 2 章 数学基础

2.1 矩阵理论	19	2.4.2 齐次变换矩阵的构成要素 ...	27
2.1.1 矩阵、行列式和逆矩阵	19	2.4.3 坐标变换和运动描述	29
2.1.2 特征值、特征向量和对角化 ...	21	2.5 解析几何	29
2.1.3 复数矩阵	22	2.5.1 基础知识	30
2.2 向量空间	22	2.5.2 几何算法	31
2.2.1 向量空间与线性映射	22	2.6 拓扑几何	32
2.2.2 坐标变换	24	2.6.1 流形	32
2.2.3 投影与投影矩阵	24	2.6.2 机器人的构形空间	33
2.3 向量分析	25	2.6.3 机器人的路径、速度、距离 ...	35
2.3.1 内积	25	2.7 图论	36
2.3.2 外积	25	2.7.1 图及其描述	36
2.3.3 多重积	26	2.7.2 树、有根树、双叉树	38
2.3.4 向量的种类	26	2.7.3 图与网络	39
2.4 坐标变换与齐次变换	26	参考文献	39
2.4.1 齐次变换与齐次坐标	27		

第 3 章 力学基础

3.1 质点运动	41	3.3.1 静力学	45
3.1.1 位置、速度、加速度和轨道 ...	41	3.3.2 运动的传递特性(transmissibili- ty)	46
3.1.2 相对运动	41	3.3.3 动力学	47
3.2 刚体运动	42	3.3.4 具体例子	49
3.2.1 自由度、位移及速度	42	3.3.5 分析力学	50
3.2.2 平面运动的运动学	43	参考文献	51
3.3 刚体力学	45		

第4章 控制基础

4.1 控制引论	52	4.3.1 状态空间法	60
4.1.1 什么是控制	52	4.3.2 传递函数法	62
4.1.2 控制系统的结构	52	4.3.3 频域传递函数	63
4.1.3 控制系统设计	53	4.4 控制理论简介	65
4.2 建 模	54	4.4.1 最优控制(LQ 控制, H_∞ 控制)	65
4.2.1 被控对象	54	4.4.2 自适应控制	66
4.2.2 数学模型	54	4.4.3 学习控制	66
4.2.3 稳定性	59	4.4.4 其 他	66
4.2.4 考 察	60	参考文献	67
4.3 反馈控制系统设计	60		

第5章 计算机科学基础

5.1 算法设计与分析	68	5.4.3 时间预测性	76
5.2 计算机结构	70	5.4.4 实时操作系统	77
5.2.1 计算机结构的定义和分类	70	5.4.5 分散实时处理	78
5.2.2 指令系统结构	71	5.4.6 实时系统的构建	78
5.2.3 硬件结构的定义	71	5.5 通 信	78
5.2.4 结构的确定方法	72	5.5.1 什么是通信	78
5.2.5 嵌入式处理器结构	72	5.5.2 模拟信号与数字信号	78
5.3 计算机语言	73	5.5.3 信号传输方式	78
5.3.1 计算机语言概述	73	5.5.4 数据传输方式	79
5.3.2 机器人系统要求的语言功能	73	5.5.5 数据传输模式	79
5.3.3 计算机语言的特点	74	5.5.6 通信协议	79
5.4 实时处理	76	5.5.7 机器人系统中的通信	80
5.4.1 实时处理的特点	76	参考文献	80
5.4.2 时间约束	76		

第2篇 元器件

第1章 传感器

1.1 传感器的基本工作原理和分类	85	1.2.6 固定坐标位置和绝对坐标的位置 检测	99
1.2 内传感器	90	1.3 外传感器	99
1.2.1 概 述	90	1.3.1 视觉传感器	99
1.2.2 位置·角度的检测	91	1.3.2 触觉传感器	104
1.2.3 速度和角速度的测量	95	1.3.3 力觉传感器	112
1.2.4 加速度和角加速度的测量	95	1.3.4 接近觉传感器	117
1.2.5 姿态角的检测	97		

1.3.5 距离传感器	122	1.3.7 特殊传感器	128
1.3.6 听觉传感器、味觉传感器及嗅觉 传感器	126	参考文献	130

第2章 驱动器

2.1 电动驱动器	136	2.3.5 气压驱动器的控制	155
2.1.1 步进电机	136	2.3.6 气动驱动器的应用	156
2.1.2 直流(DC)伺服电机	139	2.4 特殊驱动器	157
2.1.3 交流(AC)伺服电机	143	2.4.1 压电元件	157
2.1.4 直接驱动(DD)电机	145	2.4.2 超声波电机	158
2.2 液压驱动器	147	2.4.3 形状记忆元件	160
2.2.1 伺服阀的结构和特性	148	2.4.4 橡胶驱动器	162
2.2.2 液压伺服马达及其动态特性	150	2.4.5 静电驱动器	165
2.2.3 电液伺服马达	150	2.4.6 氢气吸留合金驱动器	167
2.3 气动驱动器	151	2.4.7 磁流体驱动器	169
2.3.1 气动技术概述	151	2.4.8 ER 流体	171
2.3.2 气动系统的基本组成	151	2.4.9 高分子驱动器	172
2.3.3 气压驱动器的分类	152	2.4.10 光学驱动器	174
2.3.4 气动系统的组成	154	参考文献	175

第3章 动力源

3.1 固定式机器人的动力源	178	3.2.5 气动动力源方式	186
3.1.1 电动机器人	178	3.3 电 池	186
3.1.2 液压驱动机器人	179	3.3.1 化学电池	187
3.1.3 气动驱动机器人	180	3.3.2 太阳能电池	192
3.2 移动式机器人的动力源	183	3.4 放大器	192
3.2.1 电缆方式	183	3.4.1 运算放大器	192
3.2.2 电池供电方式	184	3.4.2 功率放大器	194
3.2.3 微波(电磁能)供电方式	185	参考文献	196
3.2.4 发动机供电方式	185		

第4章 机 构

4.1 运动传动机构	198	4.1.6 特殊减速机构	203
4.1.1 齿轮传动	198	4.2 关 节	204
4.1.2 丝杠-螺母系统传动	200	4.2.1 转动关节	204
4.1.3 带、链、钢丝传动	201	4.2.2 移动关节	206
4.1.4 流体传动	202	参考文献	207
4.1.5 杆、连杆及凸轮传动	202		

第5章 材 料

5.1 机器人材料	208	5.1.9 结束语	215
5.1.1 机器人自身材料的特性	208	5.2 传感器材料	215
5.1.2 结构材料	208	5.2.1 金属材料	215
5.1.3 轻质材料	209	5.2.2 半导体材料	217
5.1.4 复合材料	210	5.2.3 有机材料	219
5.1.5 刚性材料	212	5.2.4 无机材料	220
5.1.6 抗振材料	213	5.2.5 复合材料	222
5.1.7 变形功能材料	214	参考文献	223
5.1.8 其他材料	214		

第3篇 机器人的机构及控制

第1章 概 述

1.1 机器人的机构	227	1.3 今后的发展方向	228
1.2 机器人的控制	227	参考文献	228

第2章 手臂机构和控制

2.1 手臂机构	230	2.3.8 受末端约束的机器人手臂 动力学	269
2.1.1 手臂的基本构造及种类	230	2.4 手臂的控制	270
2.1.2 关节的驱动方式	233	2.4.1 运动控制	270
2.1.3 特殊的关节结构	234	2.4.2 力控制	283
2.2 手臂运动学	235	2.5 并联机构	292
2.2.1 坐标变换的基础	235	2.5.1 概 念	292
2.2.2 正运动学方程式	240	2.5.2 历 史	293
2.2.3 雅可比矩阵的计算	244	2.5.3 主要的机构	293
2.2.4 逆运动学的解法	246	2.5.4 运动分析	293
2.2.5 奇异点	250	2.5.5 并联机构与串联机构的对比	297
2.2.6 其他方法(基于李代数的运动 分析)	251	2.5.6 应用设备	297
2.3 手臂力学	256	2.6 柔性臂	298
2.3.1 手臂静力学	256	2.6.1 柔性臂的力学	298
2.3.2 运动学与静力学的对偶性	257	2.6.2 柔性臂的控制	304
2.3.3 手臂动力学	258	2.7 控制理论的应用	309
2.3.4 动态模型的基本特性	265	2.7.1 自适应控制	309
2.3.5 正动力学问题和高效计算	266	2.7.2 最优控制	313
2.3.6 笛卡儿空间的动力学模型	267	2.7.3 学习控制	318
2.3.7 闭式链机构的动力学	267	2.7.4 非线性控制	321

2.8 手臂机构的设计和评价	326	2.8.5 非力学条件方面的设计	332
2.8.1 描述方法	326	2.8.6 功能评价	332
2.8.2 设计步骤	326	2.8.7 可靠性评价	333
2.8.3 单自由度设计	327	2.8.8 面向新的设计	335
2.8.4 多自由度的评价	331	参考文献	335

第3章 手部机构和控制

3.1 手部的分类	344	(force closure)	357
3.2 特殊末端执行器	345	3.6.1 形封闭	357
3.3 机械手	346	3.6.2 力封闭	358
3.4 手指与对象物接触的力学及运动学	349	3.6.3 被动约束和主动约束	360
3.4.1 接触形态的分类	349	3.7 刚性控制	360
3.4.2 对象物的力学和运动学	352	3.7.1 基本内容	360
3.4.3 手指的力学及运动学	352	3.7.2 向抓握系统扩展	361
3.4.4 点接触的公式以及滑动和滚动(补充说明)	354	3.8 动态控制	363
3.5 抓握系统的构成及分类	354	3.9 稳定抓握的力学关系	364
3.5.1 抓握系统	355	3.9.1 摩擦效应对抓握稳定性的影响	364
3.5.2 抓握系统的构成	355	3.9.2 考虑摩擦的二维稳定抓握模型	364
3.5.3 抓握系统中的运动约束	356	3.10 机构设计举例	365
3.6 形封闭(form closure)和力封闭		参考文献	369

第4章 移动机构

4.1 车轮式移动机构	372	4.4.1 术 语	430
4.1.1 各种车轮式移动机构	372	4.4.2 移动方式的分类	431
4.1.2 车轮式移动机构的构成要素	375	4.4.3 腿数与移动方式的关系	432
4.1.3 机 构	380	4.4.4 设计概念	432
4.1.4 运动学	385	4.4.5 腿部机构	434
4.1.5 力 学	389	4.4.6 脚部机构	435
4.1.6 动力学	394	4.4.7 躯体结构	436
4.1.7 控 制	395	4.4.8 多足机器人机构和控制稳定性	437
4.2 履带式移动机构	399	4.4.9 单足机器人	438
4.2.1 构 造	400	4.4.10 四足机器人	440
4.2.2 基础知识	402	4.4.11 六足机器人	443
4.3 双足移动机器人的机构和控制	403	4.4.12 其他腿数的机器人	444
4.3.1 双足机器人的机构	403	4.4.13 多足机器人适应不平整地面的手段	444
4.3.2 双足机器人的力学	408	4.4.14 控制系统	446
4.3.3 双足机器人的控制	416		
4.4 多足机器人的机构和控制	430		

4.4.15 多足机器人的研究动向和 课题	447	4.5.4 交互攀缘形机器人	453
4.5 形形色色的移动机构	447	4.6 水下机器人	454
4.5.1 混合式移动机构	447	4.7 空中机器人	459
4.5.2 蛇形(超冗余)机构	450	4.7.1 理论基础	459
4.5.3 壁面吸附式移动机构	452	4.7.2 各种空中机器人	463
		参考文献	468

第4篇 智能技术

第1章 视觉信息识别

1.1 机器人视觉	477	1.5 主动视觉	498
1.1.1 机器人视觉的定位	477	1.5.1 什么是主动视觉	498
1.1.2 机器人视觉的构成	477	1.5.2 主动视觉传感器	499
1.1.3 机器人视觉的功能	478	1.5.3 主动视觉的控制机构	499
1.2 视觉输入装置	478	1.5.4 传感器融合与主动视觉	500
1.2.1 视觉输入装置的构成	478	1.6 实时视觉	501
1.2.2 视觉输入的方式	478	1.6.1 什么是实时视觉	501
1.2.3 像素存取	480	1.6.2 实时视觉的历史	501
1.2.4 灵巧传感器	481	1.6.3 实时视觉的特征	502
1.2.5 特殊图像	481	1.6.4 实时视觉系统的构成方法	502
1.2.6 人为现象	482	1.6.5 实时视觉的应用	503
1.3 二维处理	482	1.7 机器视觉在生产技术中的 应用	503
1.3.1 概 述	482	1.7.1 多样化的机器视觉	503
1.3.2 图像变换方法及基本的 预处理	482	1.7.2 图像处理的产业应用和机器 视觉简史	503
1.3.3 图像特征的提取及特征量的 测量	486	1.7.3 工厂外的机器视觉	505
1.4 多维图像处理	491	1.7.4 智能制造系统(IMS)中的新 机器视觉	507
1.4.1 立体视觉	491	1.7.5 结束语	507
1.4.2 距离图像处理	494	参考文献	508
1.4.3 运动图像处理	496		

第2章 语音信息处理

2.1 语音识别	512	2.1.6 译码器	515
2.1.1 语音识别装置的分类	512	2.1.7 噪声的消除	515
2.1.2 语音识别系统的构成	512	2.1.8 对说话者的适应	516
2.1.3 语音的特征提取	513	2.1.9 远距离发话者的语音识别	516
2.1.4 音响模型	513	2.2 语音合成	516
2.1.5 语言模型	514	2.2.1 语音的特征	517

2.2.2 语音信号的模型化	517	2.3.1 支持人机界面的语音技术	523
2.2.3 语音合成的分类	518	2.3.2 语音识别的应用	524
2.2.4 TTS 的构成要素	518	2.3.3 面向通用微处理器的语音中间 软件	526
2.2.5 文本分析	519	2.3.4 网络应用	528
2.2.6 韵律生成	519	2.3.5 会话机器人的应用	529
2.2.7 语音合成单元	521	参考文献	530
2.2.8 语音信号处理	522		
2.3 语音应用系统	523		

第3章 触觉和力觉识别

3.1 触觉的平面信息识别	534	识别	538
3.1.1 触觉信息处理(tactile signal processing)	534	3.3 触觉的物性信息识别	538
3.1.2 触觉图像的几何学性质	534	3.3.1 接触型知觉的物性信息识别	538
3.1.3 被抓取物体的断面形状识别	535	3.3.2 触觉传感器的物性信息识别	539
3.1.4 二维分布载荷的中心位置 检测	536	3.4 触觉的抓握信息识别	541
3.2 触觉的立体信息识别	536	3.5 力觉信息识别	542
3.2.1 触觉传感器的三维触觉图像的 获取	536	3.5.1 接触信息的测量	542
3.2.2 基于物体表面局部触觉图像的 识别	538	3.5.2 抓取物体的位姿估计和形状 识别	543
		参考文献	544

第4章 传感器高级应用

4.1 传感器融合	547	4.3.3 动态视觉反馈控制	554
4.1.1 传感器融合的分类	548	4.4 触觉反馈控制	555
4.1.2 采用的算法	548	4.4.1 触觉顺序控制	555
4.1.3 基本融合算法的程式化	549	4.4.2 触觉反馈控制	556
4.1.4 机器人学的传感器融合	550	4.4.3 基于触觉传感器的灵巧性的 实现	557
4.2 行为理解	550	4.4.4 多触觉传感器控制	558
4.2.1 行为理解的概况	550	4.5 力觉反馈控制	558
4.2.2 行为理解研究举例	551	4.5.1 接触点的检测算法	559
4.2.3 行为理解的现状和未来	553	4.5.2 对象物形状测量	560
4.3 视觉反馈控制	553	4.5.3 考察与小结	561
4.3.1 分级控制	553	参考文献	561
4.3.2 静态视觉反馈控制	554		

第5章 规划

5.1 符号处理与推理	564	5.1.3 框架问题	568
5.1.1 人工智能	564	5.2 学习	569
5.1.2 问题的解决	565	5.2.1 什么是学习	569

5.2.2 有教师的学习	571	5.5.1 试探的行动规划的基础	589
5.2.3 无教师的学习	572	5.5.2 近似单元分割法(网格法)	590
5.2.4 以环境为教师的学习	573	5.5.3 路径图法	591
5.2.5 模仿学习	575	5.5.4 人工势场	592
5.3 软计算	576	5.6 作业规划与偏差校正	594
5.3.1 模糊系统	577	5.6.1 作业规划	594
5.3.2 神经元计算	578	5.6.2 作业规划中问题的分级	594
5.3.3 进化计算	580	5.6.3 SHRDRU	594
5.3.4 强化学习	582	5.6.4 STRIPS	595
5.3.5 智能技术的统一与融合	583	5.6.5 装配树	595
5.4 算法理论的行动规划	583	5.6.6 AND/OR 图	596
5.4.1 机器人行动规划问题	584	5.6.7 接触状态图	596
5.4.2 路径图法	584	5.6.8 偏差校正	597
5.4.3 单元分解法	586	5.6.9 基于相似度评价的偏差校正	598
5.4.4 若干已得到证明的困难问题	588	5.6.10 StateNet	598
5.4.5 结束语	588	5.6.11 状态相似度评价的问题	599
5.5 试探的行动规划	588	参考文献	599

第6章 自主移动

6.1 自身位置的识别	603	navigation)	613
6.1.1 航位推算法	603	6.3.3 基于传感器的导航(sensor based navigation)	614
6.1.2 基于外界观测的自身位置 推测	604	6.3.4 未知环境的搜索	614
6.1.3 GPS(人造卫星定位系统)	605	6.3.5 室内导航研究的最新动向	615
6.1.4 观测误差的修正	608	6.4 室外导航	616
6.2 自主移动环境模型	610	6.4.1 室外导航所必需的功能	616
6.2.1 模型化环境信息	610	6.4.2 地图信息	617
6.2.2 环境地图的表示方法	610	6.4.3 安全行走	618
6.2.3 环境地图的生成	611	6.4.4 室外导航的具体事例	619
6.3 室内导航	612	6.5 水上导航	620
6.3.1 引言	612	参考文献	621
6.3.2 基于模型的导航(model based navigation)	613		

第5篇 系统技术

第1章 机器人系统

1.1 机器人系统的构成	627	1.1.3 机器人系统的标定	630
1.1.1 机器人系统的构成	627	1.1.4 机器人系统的通信接口	630
1.1.2 机器人的软件构成	629	1.2 作业示教方法	631

1.2.1 作业示教法的分类	631	参考文献	638
1.2.2 示教信息的使用方法	635		

第2章 机器人的建模与标定

2.1 机器人的建模	639	2.2.1 机构参数的标定	641
2.1.1 机械手的运动学模型	639	2.2.2 基底参数的辨识方法	643
2.1.2 基底参数的分析	640	参考文献	644
2.2 机器人的标定	641		

第3章 机器人控制器

3.1 控制器	645	控制器的开放性	651
3.1.1 机器人控制器的定义	645	3.3.3 开放式接口举例	652
3.1.2 控制器的功能与分层递阶结构	645	3.4 PC 控制器	653
3.1.3 工业机器人控制器	648	3.4.1 PC 控制器的结构	653
3.2 软伺服	649	3.4.2 PC 控制器的接口	653
3.2.1 运动系统的伺服控制	649	3.4.3 采用 PC 控制器的机器人	654
3.2.2 伺服驱动器(放大器)的应用	651	3.5 遥控脑	654
3.3 开放式控制器	651	3.5.1 广义遥控脑的含义	654
3.3.1 开放性的现状	651	3.5.2 遥控脑的现状	654
3.3.2 机器人分层递阶结构与开放式		参考文献	655

第4章 机器人编程

4.1 机器人编程的种类与特点	656	4.2.3 动作数据结构	662
4.1.1 机器人编程	656	4.2.4 机器人语言的周边技术	664
4.1.2 机器人语言的处理流程	657	4.3 示教与编程	665
4.1.3 机器人语言的智能处理级	658	4.3.1 演示示教	666
4.2 机器人语言的功能	659	4.3.2 传感器反馈示教	667
4.2.1 机器人语言对机器人动作的控制	659	4.3.3 移动机器人编程	668
4.2.2 机器人语言的命令集	660	参考文献	669

第5章 机器人仿真

5.1 概 述	671	5.3 数学公式处理与仿真	679
5.1.1 仿真技术的作用	671	5.3.1 机器人数学公式处理系统的历史	679
5.1.2 机器人仿真技术的分类	671	5.3.2 机器人数学公式处理系统的研究课题	680
5.2 支持机器人设计的仿真技术	672	5.3.3 基于 Gröbner 基底的逆运动学解法	681
5.2.1 机器人动力学系统的运动分析仿真	672		
5.2.2 控制系统的仿真	676		

5.3.4 基本参数的分析	683	5.5.2 传感器的仿真	691
5.4 模型与图形学	684	5.5.3 软件集成开发环境	693
5.4.1 三维形状的表达	684	5.6 各种仿真工具	694
5.4.2 形状处理	687	5.6.1 引言	694
5.4.3 三维图形学	689	5.6.2 机构设计的支持工具	694
5.4.4 利用形状信息的实例	690	5.6.3 编程支持工具	696
5.5 编程仿真技术	691	5.6.4 结束语	698
5.5.1 动作仿真	691	参考文献	698

第6章 操纵型机器人

6.1 操纵型机器人系统的特征 ...	703	6.3 操纵型机器人的控制理论 ...	713
6.1.1 什么是操纵型机器人	703	6.3.1 主从系统的建模	713
6.1.2 操纵型机器人的操纵方式	705	6.3.2 双向控制和稳定性	714
6.1.3 双向控制与单向控制	705	6.3.3 时间延迟通信环境下的双向 控制	716
6.1.4 机器人学和虚拟现实与遥控的 关系	707	6.4 临场感操纵型机器人系统 ...	717
6.1.5 操纵型机器人发展方向	708	6.4.1 临场感技术	717
6.2 操纵型机器人的分类	708	6.4.2 视觉信息和听觉信息的立体 再现	721
6.2.1 机械式主从机械手	708	6.4.3 触觉信息的再现技术	723
6.2.2 伺服型机械手	709	6.5 智能远程作业系统	723
6.2.3 计算机嵌入式(异构主从 系统)	709	6.5.1 智能远程作业系统的基础	723
6.2.4 机器人技术融合型(遥控机器 人学)	710	6.5.2 智能远程作业系统的历史	724
6.2.5 网络时代的遥控机器人学	712	6.5.3 远程作业系统的智能化趋向	726
		参考文献	727

第7章 人机界面

7.1 人机交互	730	7.3 多模态界面	734
7.1.1 交互方式的分类	730	7.4 手势界面	734
7.1.2 人机界面的具体例子	730	7.5 泛在自主体界面	735
7.1.3 界面的构筑方法	731	7.5.1 泛在自主体	735
7.2 虚拟现实与机器人	732	7.5.2 人的活动识别	735
7.2.1 虚拟现实技术的动向	732	7.5.3 人的活动履历的积累	736
7.2.2 VR模型介入型远程操纵系统	732	7.5.4 人活动的能动性支持	737
7.2.3 空间共享系统	733	参考文献	737

第8章 机器人与通信系统

8.1 通信接口	740	8.2.2 协议	742
8.2 通信方式	741	8.3 无线	742
8.2.1 层次结构	741	8.3.1 IEEE 802.11	742

8.3.2 蓝 牙	743	8.6.3 VPN	746
8.4 LAN	743	8.6.4 QoS	746
8.5 WAN	744	8.7 内部 LAN	747
8.5.1 ISDN	744	8.7.1 目 的	747
8.5.2 帧转接	744	8.7.2 规 格	750
8.5.3 ATM	744	8.8 通信接口系统描述	753
8.5.4 传送延迟	744	8.8.1 背 景	753
8.6 互联网	745	8.8.2 开放式网络接口	754
8.6.1 WWW	745	参考文献	756
8.6.2 安 全	745		

第9章 机器人系统设计论

9.1 系统体系结构设计	758	9.2.2 结构设计基础	763
9.1.1 引 言	758	9.2.3 实际结构设计	766
9.1.2 机器人系统的实时性和响应 时间	758	9.3 控制系统设计	770
9.1.3 机器人系统与体系结构	759	9.3.1 集中控制和分布控制系统	770
9.1.4 集中 CPU 和分布 CPU	759	9.3.2 电子系统的构成	771
9.1.5 事件驱动的机器人动作决定的 支持	760	9.3.3 驱动器的控制	773
9.1.6 事件驱动处理和中断	760	9.3.4 实际控制器系统设计	774
9.1.7 开发环境和 OS, 软件结构的 实现	761	9.4 通信及信息处理设计	777
9.1.8 机器人系统体系结构举例	761	9.4.1 通信的作用	777
9.2 结构设计	762	9.4.2 信息交换模型	777
9.2.1 结构材料	762	9.4.3 通信相关问题	779
		9.4.4 信息处理设计	780
		参考文献	781

第10章 分布系统

10.1 分布式机器人系统概述	783	10.5 分布规划	790
10.2 可重构机器人	784	10.5.1 分布规划问题的分类	790
10.3 多台机器人协调控制	785	10.5.2 动作规划技术	790
10.3.1 单一物体的操作	786	10.5.3 搜索与扫描规划技术	791
10.3.2 分布协调控制算法	786	10.5.4 作业规划技术	791
10.4 群体机器人系统	788	10.6 分布感知	791
10.4.1 群体机器人系统的定义	788	10.6.1 多智能体的分布感知	791
10.4.2 自主分布式群体机器人系统的 分类	788	10.6.2 分布视觉的感知	792
10.4.3 群体智能	788	10.6.3 分布视觉的基本问题	792
10.4.4 创发协调	789	10.6.4 展 望	792
10.4.5 创发协调设计的可能性	789	10.7 环境智能化技术	792
		10.7.1 智能数据载体及其应用	793

10.7.2 机器人房间——环境型 机器人	794	10.8.1 功能的创发和系统	798
10.7.3 智能空间(空间智能化)	796	10.8.2 创发系统	798
10.8 创发机器人学	797	10.8.3 创发机器人学	799
		参考文献	799

第11章 机器人的可靠性、安全性、可维护性以及与人共存性

11.1 系统可靠性的定义与度量	804	11.4.2 共存作业形态的安全概念与 技术	814
11.1.1 可靠性和可维护性的定义与 度量	804	11.4.3 协调作业形态的安全概念与 技术	815
11.1.2 数据与故障分析	805	11.5 基于共存系统的协调动作和 行动	816
11.1.3 可靠性设计与试验	806	11.5.1 人与机器人的协调	816
11.2 机器人的可靠性	807	11.5.2 人体肌肉骨骼运动系统的 特点	817
11.2.1 故障分析和故障对策	807	11.5.3 手动控制方式	819
11.2.2 可靠性设计和评价	808	11.5.4 协调控制方式	822
11.2.3 工业机器人的安全性	808	11.6 共存系统亲和性的表现	824
11.3 人为错误	810	11.6.1 亲和性的表现	824
11.3.1 人类行动模式和特点	810	11.6.2 安全与协调作业意图的 推断	825
11.3.2 人为错误的结构	812	参考文献	827
11.3.3 人为错误的对策	813		
11.4 共存系统的安全性	813		
11.4.1 危险分析和降低风险的 步骤	813		

第6篇 新一代机器人基础技术

第1章 拟人机器人

1.1 拟人机器人的硬件	833	1.4 以拟人机器人为媒介的认知科学 研究	850
1.2 拟人机器人的运动控制与动作 规划	839	1.4.1 以拟人机器人为媒介的认知 科学研究的意义	850
1.2.1 步行模式生成器、反馈控制	839	1.4.2 研究实例介绍	851
1.2.2 运动规划与全身运动	841	1.4.3 用于认知科学研究的拟人机器 人所必须具备的硬件与软件	852
1.3 仿人作业	844	参考文献	853
1.3.1 仿人手臂和手	844		
1.3.2 仿人远程操作	848		

第2章 微机器人学

2.1 微驱动器	857	2.1.3 电磁微驱动器	859
2.1.1 压电微驱动器	858	2.1.4 形状记忆合金微驱动器	860
2.1.2 静电微驱动器	858	2.1.5 超磁致伸缩微驱动器	861

2.1.6 高分子微驱动器	861	2.3.3 非接触式操作	867
2.1.7 光微驱动器	861	2.4 微机器人系统	872
2.2 微传感器	862	2.4.1 管内移动机器人	872
2.2.1 应变微传感器	862	2.4.2 微动机器人	873
2.2.2 加速度微传感器	862	2.4.3 医疗用微机械	873
2.2.3 压力微传感器	863	2.4.4 微工厂	874
2.3 微操作	863	2.5 纳米操作	874
2.3.1 微操作种类	863	参考文献	876
2.3.2 接触式操作	864		

第3章 仿生机器人

3.1 假臂与假腿(四肢的修复) ...	881	3.4.1 视觉功能的修复	890
3.1.1 假 腿	881	3.4.2 视觉代偿原理	891
3.1.2 假 臂	883	3.4.3 各种视觉代偿仪	891
3.1.3 假腿与假臂的发展动向	884	3.4.4 视觉代偿中的机电一体化	892
3.2 人工心脏	885	3.5 人工关节	892
3.2.1 人工心脏技术的发展动向	885	3.5.1 生物学条件	892
3.2.2 人工心脏的性能要求	885	3.5.2 力学条件	893
3.2.3 人工心脏的血泵机构和单元 技术	886	3.5.3 其他条件	893
3.2.4 血液相容性评价法	887	3.5.4 人工关节的设计	893
3.2.5 展 望	888	3.5.5 下一代人工关节	894
3.3 人工中耳(听觉修复)	888	3.6 人工肌肉	895
3.3.1 耳的结构与功能	888	3.6.1 微型化与表面张力	895
3.3.2 失聪的种类	888	3.6.2 肌动球蛋白(actomyosin)的 运动功能	895
3.3.3 人工中耳	888	3.6.3 微型化可能的新原理	896
3.3.4 人工中耳的结构、原理和性能	889	3.6.4 结束语	897
3.3.5 安全性	890	参考文献	897
3.4 人工视觉(视觉代偿)	890		

第7篇 机器人在制造业中的应用

第1章 工业工程概论

1.1 方法工程	901	1.3 制造工序设计	909
1.2 人机工程学	905	1.3.1 生产工序和工序设计	909
1.2.1 人机工程学的必要性	905	1.3.2 工序设计的环境	909
1.2.2 何谓人机工程学	906	1.3.3 工序设计的精度	911
1.2.3 人机工程学的研究内容	907	1.4 设施的设计	911
1.2.4 人机工程学的发展趋势	908	1.4.1 设施设计的周边技术	912

1.4.2 布局类型	912	1.6 面向技术人员的定量方法论 ...	915
1.4.3 设施布局的方法	912	1.6.1 工序分析	915
1.4.4 SLP 概述	913	1.6.2 流程图分析	916
1.5 经济工程学	914	1.6.3 运行分析	917
1.5.1 损益拐点的分析	914	1.6.4 动作分析	918
1.5.2 工序设计的经济性研究	914	1.6.5 复合活动分析	919
1.5.3 资金的时间价值与经济性 评价	915	1.6.6 时间的研究	919
		参考文献	920

第2章 机器人在制造业中的应用

2.1 工业机器人总论	922	2.3.1 FA 工厂自动化	928
2.1.1 工业机器人构成	922	2.3.2 AGV 的种类	928
2.1.2 工业机器人软件	922	2.3.3 引导方式	929
2.2 通用机械手总论	923	2.3.4 移动方式	930
2.2.1 工业机器人的使用状况	923	2.3.5 装卸方式	930
2.2.2 工业机器人技术	926	2.3.6 搬运系统	931
2.2.3 机器人的有关规格	927	2.3.7 应用系统	932
2.3 AGV	928	参考文献	932

第3章 各种作业与机器人

3.1 物料搬运	933	3.5.1 普通装配(汽车零部件)	954
3.1.1 铸造	933	3.5.2 插装和表面贴装	957
3.1.2 树脂成型加工	934	3.5.3 螺钉紧固	959
3.1.3 冲压	936	3.5.4 汽车舢装	962
3.1.4 机械加工	938	3.5.5 键 合	964
3.2 焊 接	939	3.6 洁净间	968
3.2.1 弧 焊	939	3.6.1 晶片操作	969
3.2.2 点 焊	942	3.6.2 LCD 搬运	971
3.2.3 激光焊接·切断、激光热加工	944	3.6.3 洁净间无人搬运车(AGV)	973
3.2.4 等离子弧焊和等离子切割	944	3.7 测量、检查及试验	977
3.3 喷 涂	946	3.7.1 汽车制造应用事例	978
3.3.1 普通喷涂	946	3.7.2 用于电子设备制造的检测 机器人系统	978
3.3.2 密封材料的喷涂	948	3.7.3 油管接头螺纹检测机器人	979
3.4 去毛刺	950	3.7.4 试剂库自动识别系统	979
3.4.1 毛刺造成的主要事故举例	950	3.8 工业智能机器人	980
3.4.2 去毛刺成本最小化的主要 事项	950	3.8.1 工业智能机器人的目的和 作用	980
3.4.3 去毛刺系统应具备的功能和 关键技术	951	3.8.2 基于力传感器的机械装配 作业	980
3.5 装 配	954		

3.8.3 基于视觉传感器的周边设备的 简化	981	3.8.5 结 论	984
3.8.4 基于传感器的示教简化	983	参考文献	984

第4章 机器人与安全

4.1 安全规范与规则	986	4.3 具体的应对方法	988
4.1.1 安全的基本思路	986	4.3.1 劳动安全卫生规范	988
4.1.2 安全确认原则与失效保护	987	4.3.2 安全防护的具体方法	989
4.2 与机器人安全相关的法规	988	4.3.3 两种互锁方法	990
4.2.1 国际规范(ISO/IEC)	988	4.4 今后的课题	992
4.2.2 日本与机器人相关的法规	988		

第8篇 机器人应用系统

第1章 机器人在非制造业领域中的应用

1.1 第一产业	995	1.3.1 表演娱乐机器人	1015
1.1.1 农业机器人	995	1.3.2 保安机器人	1019
1.1.2 林业机器人	998	1.3.3 清扫机器人	1021
1.1.3 水产机器人	1000	1.3.4 带电操作机器人	1023
1.2 在建筑业中的应用	1005	1.3.5 管道维护机器人	1024
1.2.1 建筑机器人	1005	1.3.6 ITS	1028
1.2.2 土木工程机器人	1010	1.3.7 电影与机器人技术	1032
1.3 在第三产业中的应用	1015	参考文献	1033

第2章 医疗机器人

2.1 医疗机器人的应用范围	1038	2.3 福利机器人	1044
2.2 手术支援机器人	1039	2.4 医学教育机器人	1044
2.2.1 计算机外科和手术支援 机器人	1039	2.5 医疗福利机器人的安全性	1044
2.2.2 手术支援机器人的实例	1041	参考文献	1044

第3章 福利机器人

3.1 福利事业的基础	1046	3.2.2 举 例	1049
3.1.1 术 语	1046	3.2.3 福利机器人的机能和控制	1053
3.1.2 康复医学	1048	3.3 精神慰藉机器人	1053
3.2 福利设备、机器人	1049	参考文献	1055
3.2.1 分 类	1049		

第4章 机器人在特殊环境及特殊作业中的应用

4.1 灾害应对机器人	1057	4.3.2 海洋机器人的种类和发展	1072
4.1.1 消防机器人(fire fighting robot)	1057	4.3.3 ROV	1073
4.1.2 灾害应对机器人(disaster response robot)	1059	4.3.4 AUV	1073
4.1.3 与救助机器人相关的比赛(rescue robot contests)	1063	4.4 空间机器人	1077
4.2 极限环境作业机器人	1066	4.4.1 轨道机器人	1077
4.2.1 极限环境作业	1066	4.4.2 轨道机器人的实例	1078
4.2.2 极限作业机器人计划	1067	4.4.3 行星机器人	1080
4.2.3 核设施与机器人	1068	4.4.4 行星机器人的实例	1080
4.3 海洋机器人(水下机器人)	1072	4.5 探雷/排雷机器人	1082
4.3.1 海洋的特殊性	1072	4.5.1 人道目的和排雷	1082
		4.5.2 地雷和排雷技术	1082
		4.5.3 探雷机器人	1083
		参考文献	1086

第5章 机器人在研究与教育领域中的应用

5.1 机器人的研究	1090	作用	1092
5.2 利用机器人开展的研究	1090	5.4.1 日本的机器人赛事	1092
5.3 机器人在学习、培训中的应用	1091	5.4.2 机器人创造国际比赛大会(RoboFesta)	1094
5.3.1 教育培训	1091	5.5 机器人的研究开发	1095
5.3.2 学习与机器人制作	1091	参考文献	1095
5.4 机器人对科学技术教育的推动			

附 录

1 机器人的 JIS 标准	1099	4 人体关节、骨骼和肌肉的名称	1105
2 工业机器人的图形符号	1102	5 机器人安装空间	1107
3 人体关节的可动范围	1103	6 电气元器件新旧图形符号对照	1109

索 引	1111
-----------	------

第1篇 基础

Robotics Handbook

第 1 章 机器人概述

1.1 机器人

“机器人”这一词汇在日常生活中常常用到。但在日语中,“机器人”并不是指特定的机械或机器,很多情况下人们根据自己的主观判断将某种机械称为机器人,很多人也认同这种做法。因此,人们对于机器人的认识是形形色色的,没有一个统一的定义。基于此,加藤一郎(已故)先生在 1990 年出版的《机器人技术手册》^[1](第一版)中,从多个角度对“机器人的定义”进行了阐述,以说明机器人的主要含义。从目前来看,加藤一郎给出的定义仍然具有重要意义,为此在 1.1.1 节中将该部分内容按原文照录。

1.1.1 机器人定义

迄今为止,技术领域中的每一个术语(technical term)都有明确的定义。然而,对于“机器人(robot)”的定义至今依然如盲人摸象,仁者见仁,智者见智。究其原因,主要是因为机器人是“模仿人”的,而“人”是什么则是自古以来的一个哲学命题,且近年来又成为现代科学的命题之一。

在给机器人下定义之前,有必要先从词源方面加以考察。“机器人”是 20 世纪出现的一个新名词。1920 年,捷克剧作家卡雷尔·卡佩克(Karel Capek)在他的《罗萨姆万能机器人公司(R. U. R: Rossum's Universal Robots)》剧本中,第一次使用了机器人这个词。在捷克语中,罗萨姆(Rossum)的意思是理性(reason),它是由 rozum 转用而来。古代斯拉夫语中的 robota 有强制劳动的意思,卡雷尔·卡佩克据此造出了具有“奴隶机器”含义的新词 robot。

在古希腊语中,“automaton”指的是原始的机械装置。到了 18 世纪,该词在英语中表示与钟表技术有关的、靠发条工作的机械。但是,当卡雷尔·卡佩克造出 robot 这个词

后,automaton 就很少使用了。因此可以说,工业革命以后技术的迅速发展促使卡雷尔·卡佩克萌发了创作该剧的灵感,并造出“机器人”一词。词汇的变化反映着社会与技术的变迁。卡雷尔·卡佩克基于人造人的思想所提出的科幻意义上的机器人一词,随着工业机器人的出现而具有了较强的技术含义。

日本的“人工手研究会”(现改为仿生机构学会)和视听觉信息研究会于 1967 年共同举办了第一届机器人学术会议。对于机器人的定义当时有两种典型的意见。一种是森政弘与合田周平^[2]的定义,即“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性和奴隶性等七个特性的柔性机械。”从这一定义出发,森政弘^[3]用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性和移动性等十个方面的特性来描述机器人。另一种是加藤一郎^[4]的定义,即把具备图 1.1 中三个条件的机械称为机器人。

- ① 具有脑、手、脚三要素的个体。
- ② 具有非接触和接触的传感器。
- ③ 具有平衡觉传感器和固有觉传感器。

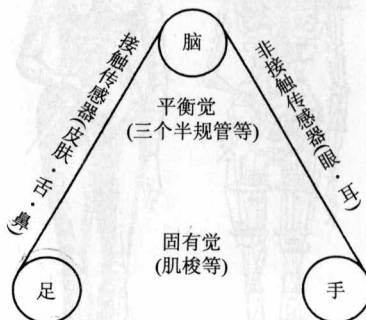


图 1.1 机器人的三个条件

该定义强调了机器人的仿人特点,即用手进行作业,用脚实现移动,由脑来完成统一指挥的功能。非接触传感器和接触传感器相当于人的五官,用于识别外界环境,平衡觉传

传感器和固有觉传感器则是机器人感知自身状态不可或缺的。这里的机器人是指自主式机器人,而不是自动机械或工业机器人。就像人由于某种原因丧失了身体的某一部分或某一器官的功能后仍然还是人一样,机器人也不一定具有上述所有构成要素。现在之所以对机器人的定义多种多样,就是因为机器人本身存在着模糊性。由于动物一般也具有上述要素,所以也可以把机器人模仿人更加广义地理解为模仿动物。

上述定义中没有涉及机器人的外形问题。早在卡雷尔·卡佩克提出机器人一词的30多年前即1886年,法国作家维利埃·德利尔-亚当(Villiers del'Isle-Adam)在他的小说《未来的夏娃》中写到爱迪生(Edison)发明了绝代佳人“阿达莉”。在这本小说中,第一次出现了安德罗丁(android)一词,并把具有拟人外形的机器命名为“安德罗丁”,如图1.2所示。“阿达莉”由以下四个部分组成^[5]:

① 生命系统(平衡、行走、发声、身体摆动、感觉、表情、调节运动、灵魂等)。

② 造形介质(关节能自由运动的金属覆盖体,一种盔甲)。

③ 人造肌肉(包裹在造形介质外部的东西,包括肌肉固有的发散物、静脉、性别特征等所有身体形态)。

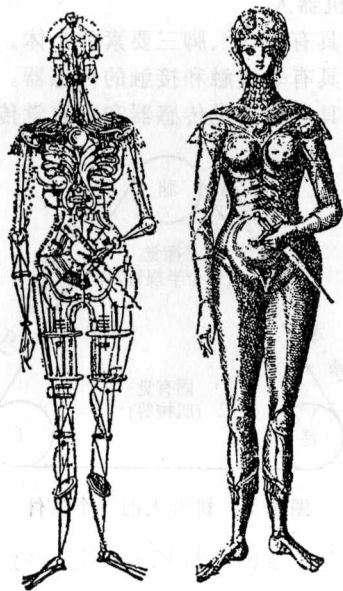


图 1.2 《未来的夏娃》中的美女机器人

“阿达莉”^[5]

④ 人造皮肤(包括肤色、肌理、轮廓、头发、视觉组织、牙齿、指甲等组织)。

机器人“阿达莉”是在当时的技术背景下,作者根据自己的梦想和思想编造出来的。自古以来人类就一直梦想着能造出机器人,直到19世纪才有了机器人的具体形象,并称之为“安德罗丁”。

1942年,科学家兼作家阿西莫夫(Asimov)提出了机器人学三原则^[6]:

第一,机器人必须不危害人类,也不允许它在人类受伤害时袖手旁观。

第二,机器人必须绝对服从人类,除非命令违反了第一条原则。

第三,在不违反第一和第二条原则的前提下,机器人必须保护自身不受伤害。

上述三原则构成了机器人的伦理性纲领,也可以说是对机器人的定义。

下面介绍几个国外学者关于机器人的定义。

美国斯坦福大学的B.Roth认为,机器人是一种与人、动物或其他机械协同工作的机械,包括自动型和半自动型。机器人与其他自动机械之间没有十分明显的差别,但它具有较强的易变性和商品倾向,其意义也随着时代的发展而发生改变。意大利米兰工业大学的Rovetta认为,机器人学是这样一门边缘学科:能够使人类在与自然的不懈斗争中,通过不断提高活动能力逐步变成“工作人”、“聪明人”、“智能人”。

法国科研国家中心(CNSR: National Council of Scientific Research)的B. Espiau于1988年7月给机器人学下的定义为:机器人学是以能实现下述目标的系统的使用方法为研究对象的学问,即能够根据传感器的信息完成预先制定的工作任务。

另外,从机械设计的观点出发,美国K.J. Waldron^[7]提出了如下定义:机器人是一种具有较多自由度,由与机构之间具有接口的主动系统进行决策和控制的机械。这里所谓的主动系统是指工业机器人中由计算机控制的伺服驱动器,或是遥控操作机中,作为系统一部分的控制操纵杆的操作者。至此,机器人的定义终于具有了一定的技术色彩。

加藤一郎

以下是对上述论述的一些补充。

android是由希腊语中表示“male”、“stamen”的造词要素“andro-”与接尾词“-id”构成的合成词,其中,“-id”在动物分类上表示属于相同的科。现在,人们将“humanoid”与 android作为同义词,用于称呼拟人机器人。该词于20世纪40年代第一次出现在Jack Williamson的科幻小说“With Folded Hands”中,是宇宙人为服侍人的机器人“安德罗丁”所起的名字。

机器人的有关标准和规格已经进行了必要的修订。下面以加藤关于制造环境中机器人的定义为基础,对2004年的修订内容加以说明。

国际标准ISO 8373:1994中,《工业操作机器人——用语》(*Manipulating industrial robots-Vocabulary*)的定义为“[A] Manipulating industrial robot is an automatically controlled, reprogrammable, multi-purpose, manipulative machine with several degrees of freedom, which may be either fixed in place or mobile for use in industrial automation applications”。这与美国机器人学会(RIA: the Robot Institute of America)1972年对机器人的定义相近,即“A reprogrammable, multifunctional manipulator designed to move material, parts, tools, or specialized devices through various programmed motions for the performance of a variety of tasks”。日本工业标准《工业操作机器人——用语》(JIS B 0134:1998)中,对“工业机器人”(industrial robot)和“工业操作机器人”(manipulating industrial robot)分别进行了定义。工业机器人是“一种能够通过自动控制来进行操作或移动,且由程序对各种作业进行控制的工业用机械”;工业操作机器人为“3轴以上、可自动控制、能够再编程、移动或固定的通用操作机械。”ISO中没有与“工业机器人”相对应的内容。

可见,专家们对于“机器人”定义的见解尚未统一,JIS B 0134中也未对其进行定义。其实,日本机器人学会内部也在争论到底是“机器人工程学”还是“机器人学”,并多次对“机器人”的定义进行了讨论,但均无果而终。尽管没有定义,机器人已经在制造业中获得

了广泛应用,非制造业的应用开发也开展得如火如荼,而且已经产生了巨大的社会影响。

随着时代的发展,“机器人”定义的问题仍将不断困惑着人们。

1.1.2 逻辑学定义^[8]

逻辑学(logic)包括形式逻辑学和符号逻辑学。作为信息科学理论基础之一的逻辑数学主要研究后者,即符号逻辑学(symbolic logic)。相对于古希腊亚里士多德的形式逻辑学,符号逻辑学被称为现代逻辑学。不过两者并不是二选一的关系。在符号逻辑学的研究中,形式逻辑学起着重要的作用。由于逻辑学是研究正确的思考形式和法则的学问,故成为各门学问研究的基础,因而又被称为是“学问的学问”(science of sciences)。

如前所述,关于“机器人”究竟是什么目前尚无一致的意见。下面对形式逻辑学中的定义方法作一介绍,以作为将来进行机器人定义时的参考。

在形式逻辑学中,“概念”是最基本的要素。在概念的逻辑结构中,包括了“内涵”和“外延”两个方面。内涵是指概念所包含的意义,外延则表示概念所适用的对象。例如,三角形这一概念的内涵是“三条直线所围成的平面图形”,外延是正三角形、直角三角形等,即三角形这一概念所包含的所有的三角形。

从概念外延的大小来看,外延大的称为“类”(上位概念),外延小的称为“种”(下位概念)。某概念直接上位的类称为“最近类”,其直接下位的种称为“最近种”。“同位概念”是指同一类下的多个种概念,“种差”是指同位概念相互区别的特有属性。例如,在分析动物和人的关系时,因为动物包含了人,所以动物是人的最近类;同时,人又是动物的最近种。如果将动物作为一个类,则同位概念可以举出人、猴子、狗等。人类区别于其他动物的种差,则可以举出“理性”这一属性。

对概念的内涵进行准确论述的逻辑学步骤称为“定义”。关于定义方法的分类,不同的书籍之间略有差异,表1.1给出了一个定义方法的例子。

表 1.1 定义的方法

定 义	方 法	备 注
实质性定义	利用“最近类”+“种差”来进行的定义,即通过分析概念对象的内涵来定义	根据亚里士多德的“类”和“种差”定义,或者说是分析式的定义
发生性定义	通过列举概念对象的产生、成立条件来定义的方法	也称为综合性定义
名义性定义	将难以理解的概念用相同内涵的易于理解的同义词代替,或者翻译成具有相同含义的本国语言来定义的方法	也称为名义性定义
指示性定义	用某种行动来描述概念所指的对象的方法	
操作性定义	指出测量所需要的操作来定义物理概念的方法	

下面举一个例子,对机器人定义的实质性方法进行研究。

首先,假设机器人的类概念为自动机械。在同一个类概念中,假设机器人与其他自动机械的种差为智能性。于是,“机器人”可以定义为智能化自动机械。虽然定义的方法是这样的,但是该定义本身还没有得到专家的一致认可。理由之一是对于机器人的类概念尚未取得一致的认识;理由之二是对于机器人的种差还没有形成统一的看法。假设中使用了“智能性”这一术语,但是“智能性”到底指什么?除了“智能性”外,是否还有更恰当的术语来描述种差?因此还有许多东西有待考虑。

梅谷阳二

1.2 机器人的历史

如 1.1 节所述,“机器人”这一术语产生于 20 世纪,历史非常短暂。但制造像机器人般的自动机械,却是人类有史以来一直追求的一个梦想。这是与人类希望了解自身的愿望密切相关的,因此,实现仿人机械的不懈努力构成了古今人类文化的一个重要方面。

1. 机器人概念的产生

机器人概念的产生可以追溯到古希腊神话。

公元前 8 世纪左右,在荷马(Homeros)所著《伊利亚斯》的“制造武器”中,描写了海拜斯特(Heebaistos)火神用黄金制造出宛如

少女般的机器。这可以理解为古希腊人对机器代替人从事锻冶一类笨重劳动的美好憧憬。

还流传有这样一个神话,说有个名叫“泰罗斯”(Tallos)的青铜巨人负责巡视和守卫克里特岛,防御他国的进攻。

传说公元 250 年左右,犹太人曾用泥做成人造小人。“泥”在希伯来语中是“戈莱姆”,这种泥人遂被称为戈莱姆(Golem)。根据这一传说,梅林克于 1915 年写出了小说《戈莱姆》。

在西欧,从公元前 8 世纪至公元 4 世纪一直有关于机器人的传说,但其后却失传了。

2. 古代技术

下面从实用技术的角度追溯一下机器人发展的足迹。

据传说,公元前 2 世纪左右,拜占庭的皮劳恩(Pilon)就会利用蒸汽或压缩空气模仿鸟鸣。亚历山大时代的库迪希比奥斯(Ktesibios)则制造出了自动水钟。

亚历山大时代(公元前 1 世纪左右)有一位技术发明家希罗(Hero,生卒年不详),传说他造出过多种自动装置。其中最著名的是神殿自动门(图 1.3)。它以祭坛的火为热源,靠虹吸原理自动开闭神殿大门。他还做过与神殿有关的自动圣水装置。这实际上就是一种圣水自动销售机。

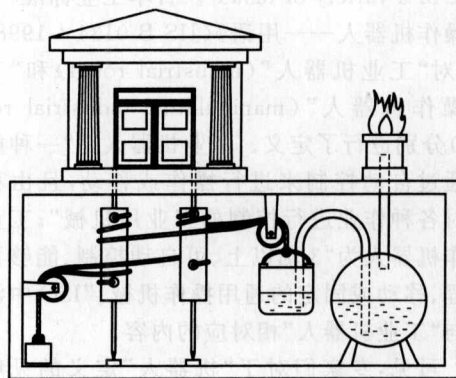


图 1.3 希罗的自动门

后来古希腊的这些技术流传到阿拉伯,进而又在 12 世纪之后欧洲文艺复兴时期钟表等精密制造的技术中得到传承。

3. 自动玩偶

14 世纪前半叶,在意大利的城市中首次

出现了公用机械时钟,其后逐渐普及到欧洲各地。

那些塔钟还可兼作天文时钟,用来表示日月星辰的运行。钟表的设计造型都相当精巧,如有金鸡报晓、天子捧笏、骑士击钟、士兵行进等。1656年,荷兰科学家惠更斯(Huygens)发明了带摆的时钟。从此,时钟作为精密机械得到了进一步发展。

时至16~18世纪,采用时钟技术的自动玩偶问世。它们最初只是充当王公贵族的玩物,后来才逐步进入市民社会,并传播到世界各地。

1738年,纺织技师沃康松(Vaucanson)在巴黎科学院公开展示了吹笛童子、击鼓少年和机械鸭子等自动玩偶(图1.4,图1.5)。据记载,机械鸭子能完成啄食、排泄、鸣叫、游泳等动作。

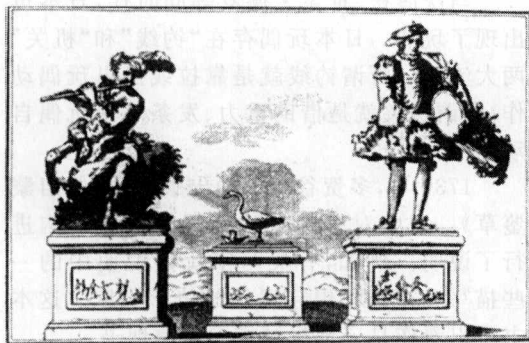


图 1.4 沃康松的自动玩偶

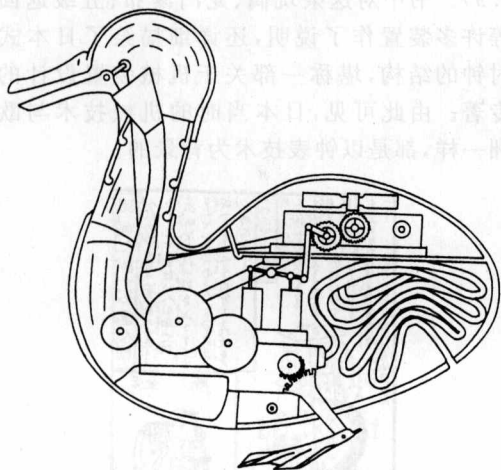


图 1.5 沃康松的机械鸭子

1773年,瑞士的雅盖·德罗(Jaquet Droz)父子制作了写字、绘画、风琴演奏等三

种自动玩偶。它们制作精巧,表演逼真,宛如真人一般。例如,自动演奏玩偶能够向听众行礼、改变视线及鼓动胸部等。雅盖·德罗制作的绘画和演奏玩偶如图1.6和图1.7所示。



图 1.6 雅盖·德罗的绘画玩偶



图 1.7 雅盖·德罗的演奏玩偶

4. 笛卡儿(Descartes)和拉·梅特里(L. Mettrie)

自动玩偶的发展与当时的哲学思想有深刻的联系。

笛卡儿是17世纪的大哲学家。笛卡儿在《方法谈》中引用哈维(Harvey)于1628年发表的《动物心血运动的解剖研究》,认为可

以把人和动物的“身体”看作“机械”。笛卡儿从“我思,故我在”的观点出发,认为“思维”或“精神”是区分人类和其他生物、动物的绝对标准,即所谓身心二元论。

1747年,拉·美特利(La Mettrie)在《人体机械论》中写到:“人是极其复杂的机械。最伟大的哲学家们,先天(a Priori)地即‘借助于精神之翼的力量而进行的一切探求皆为空’之所以正确,其原因正在于此”,指出了笛卡尔学说中存在的问题。

人体机械论思想的萌芽在拉·美特利之前的17世纪就已出现。例如,波雷利(Borrelli)在《关于动物的运动》一书中就阐述了肌肉运动与机械运动完全相似的观点。18世纪末哥白尼发现了生物电,更进一步证实了这种观点。

沃康松公开展示自动玩偶比拉·美特利发表《人体机械论》早10年左右。拉·美特利指出:“人与猴子,也即与头脑最发达的动物之间的关系,恰如惠更斯的行星仪与尤利安的钟表的关系。表示星辰运行的时钟与一般的计时刻表相比,需要更多的机械、更多的齿轮和更多的发条。对沃康松而言,如果说制作吹笛童子比制作鸭子需要更多的技巧的话,那么制作讲故事的玩偶无疑需要更多的技术”。由此可见,拉·美特利是了解沃康松的自动玩偶的。

在拉·美特利发表《人体机械论》26年后,雅盖·德罗父子制作出了三个著名的自动玩偶。

5. 19世纪的发展

钟表在市民阶层中的普及促进了大批量廉价产品的出现。从19世纪中叶起,自动玩偶分化为幻想和机构两个流派,并各自在文学艺术和近代技术中找到了自己的位置。1818年,雪莱(Shelley)创作了《妖怪》;1831年,哥德(Goethe)在《浮士德》中塑造了人造人“荷蒙克鲁斯”;1870年,霍夫曼(Hoffmann)出版了以自动玩偶为主角的作品《葛蓓莉娅》;1883年,科洛迪(Collodi)的《木偶奇遇记》问世。利拉丹(L'Isle-Adam)在他1886年出版的小说《未来的夏娃》中塑造了一位美女机器人“阿达莉”,并详细刻画了其各部分的构造。

在实际的机械制作方面,有记录可查的是1893年乔治·莫尔(George More)制造的“蒸汽人”(图1.8),它是靠蒸汽驱动腿部来行走的,其腰部由杆件支撑,只能沿着圆周走动。

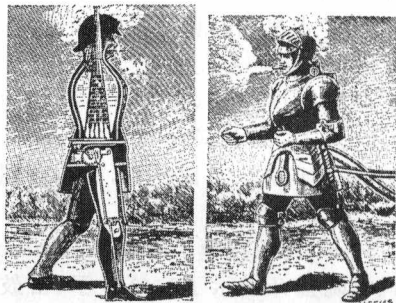


图1.8 乔治·莫尔的蒸汽人

6. 日本的自动玩偶

与沃康松、雅盖·德罗等同时代,日本也出现了玩偶。日本玩偶存在“钓线”和“机关”两大流派。所谓钓线就是靠拉线操纵玩偶动作;所谓机关就是借助重力、发条等使玩偶自动动作。

1730年,多贺谷环中仙出版了《机关启蒙鉴草》。书中对多种自动玩偶的机械结构进行了说明。例如,有关写字玩偶说明中的一些描写会让人联想起现代的仿形机床。这本书可以看作是一部机械方面的原理书。

1796年,细川赖直出版了《机巧图汇》(图1.9)。书中对送茶玩偶、龙门瀑布、五级返回等许多装置作了说明,还详细描绘了日本式时钟的结构,堪称一部关于机械装置设计的专著。由此可见,日本当时的机械技术与欧洲一样,都是以钟表技术为背景的。



图1.9 《机巧图汇》中的送茶玩偶

钟表技术的关键是擒纵机构。经考证,擒纵机构是8世纪左右由中国发明的。因此可以说中国是钟表技术的发源地。

日本的自动玩偶在设计思想上与欧洲存在本质的区别。欧洲的自动玩偶能精确地模仿人的动作,追求写实;日本的自动玩偶追求的则是抽象艺术。

7. 20 世纪的科幻(SF)世界

1920年,捷克作家雷尔·卡佩克创作了剧本《罗萨姆万能机器人公司(R. U. R.)》,剧情是这样的:随着代替人劳作的机器人数量日益增加,它们相互之间逐渐产生了感情,最终欲与人类为敌,消灭人类。但是,机器人并不了解自己的制造方法,在解剖研究的过程中,两台男、女机器人因相互保护而萌生爱情,从而诞生了新的机器人亚当和夏娃。

1942年,阿西莫夫在他的第四部有关机器人的短篇小说 *Runaround* 中,第一次提出了机器人三原则,1950年又出版了著名的《我是机器人》。此后他发表了多篇基于上述三原则的作品,这些作品对其他作家产生了很大的影响。

时至今日,已经出版了大量以机器人为题材的科幻小说(SF)。从内容上来看,可以分为以 R. U. R 为代表的机器人消灭人类的悲观派,和以《未来的夏娃》为代表的机器人成为人类最好伴侣的乐观派。20 世纪中期以后,科幻电影中出现了很多的机器人。其中具有代表性的是 1977 年公映的美国电影《星球大战》(*Star War*)中的 C3-PO 和 R2-D2。

8. 现代机器人

现代机器人的研究始于 20 世纪中期,其技术背景是计算机技术和自动化技术的发展,以及原子能的开发利用。

自 1946 年第一台数字电子计算机(ENIAC)研制成功以来,计算机技术取得了惊人的进步,正在向高速、大容量、小型化、低价格的方向发展。

省力化和大批量生产的迫切需求推动了自动化技术的发展,并在 1952 年诞生了第一台数控机床(NC)。数控机床开发中对控制技术、机械零件的研究为机器人开发奠定了技术基础。

在原子能实验室那种恶劣的环境下,要

求用机械来代替人处理放射性物质。为此,美国原子能委员会的阿尔贡研究所于 1947 年开发了遥控机械手,次年又开发出了机械式的主从机械手。

1948 年,维纳(Norbert Wiener)出版了成为机器人控制理论基础之一的著作《控制论:关于在动物和机器中控制和通信的科学》(*Control and Communication in the Animal and the Machine*)。

1954 年,美国的德沃尔(Devol)第一次提出了工业机器人的思想,并申请了专利。现在,工业机器人已经在各个工业部门获得了广泛应用。关于工业机器人的发展历程,将在 1.3 节详细说明。

日本的爱达工程(Aida Engineering)公司于 1968 年在晴海展览馆公开展示了称为“自动手”的机器人。1970 年后机器人的研究得到了快速发展。1970 年在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议(ISIR),1973 年在意大利召开了第一届 RMS(Ro. Man. Sy)。同年,世界上第一个拟人机器人 WABOT-1 诞生,如图 1.10 所示。

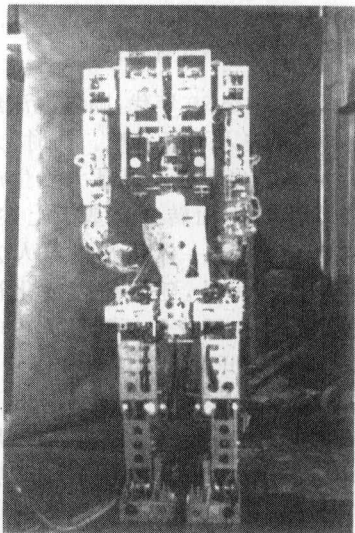


图 1.10 WABOT-1(早稻田大学,1973)

1967 年,日本的人工手研究会(现改名为仿生机构学会)等召开了第一届机器人学术会议。1973 年,日本工业机器人工业会(JI-RA,即现在的日本机器人工业会(JARA))成立。不过直到 1980 年,工业机器人人才在日本获得真正的普及,故将该年称为“机器人元

年”。1983年,日本机器人学会(RSJ)成立。

1983~1991年,日本的经济产业省(原通商产业省)制定了极限作业机器人研究计划,以应对核设施等的灾害处理。在1985年的筑波世界科学博览会上,日本政府主题馆展示了键盘乐器演奏机器人 WASUBOT(图 1.11)等许多面向未来的机器人。

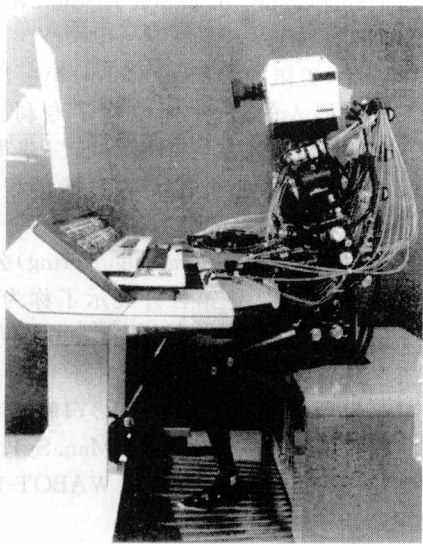


图 1.11 WASUBOT(早稻田大学、住友电气工业,1985)

但到了20世纪90年代,随着泡沫经济的破灭,日本经济进入了萧条期。同时,人们更加个性化的追求也促使产品从大量生产向多品种小批量生产方面转变。基于上述原因,企业在自动化、机电一体化及机器人方面的投资逐年减少。另外,随着超高龄化社会的来临,政府、企业在医疗和福利设施机电一体化、机器人化研究开发方面的投资逐渐加大。

1996年,本田技术研究所研制出了高性能的拟人机器人 P2(图 1.12),它能够用两条腿平稳地上下楼梯。该成果在各国研究人员中引起了轰动,于是掀起了世界范围内的拟人机器人研究热潮。从1998年起,日本开展了历时5年的国家研究计划“与人协作共存型机器人”(HRP,拟人机器人计划)。其开发目标是在人类的生活和作业环境中,利用基于通信网络的远程遥控技术,能够与人协作共同完成复杂作业,或能够在复杂地形上灵活移动的机器人。在美国,作为人工智能研

究的手段,开始了拟人机器人制作的 Cog 计划。在德国,则启动了由政府、企业和研究机构共同参与的 morpha 计划。

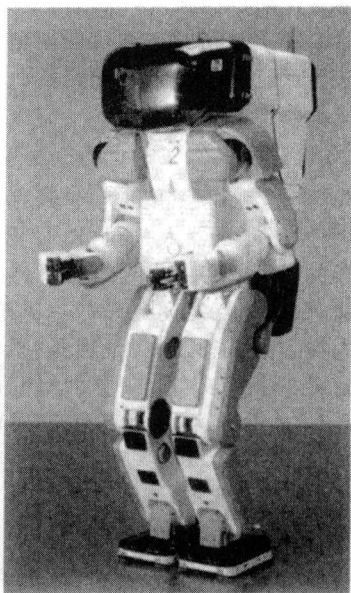


图 1.12 P2(本田技术研究所,1996)

从20世纪末到如今的21世纪,机器人研究的新领域不断出现。索尼公司在1997年研制成功了世界上第一个真正的娱乐机器人 AIBO(图 1.13)。1995年1月的阪神淡路大地震灾和2001年美国的9.11事件,都促使人们对能够在灾害现场搜寻负伤者的救援机器人展开了研究。排雷机器人的研究也正在进行之中。

表 1.2 为机器人发展的大事年表。

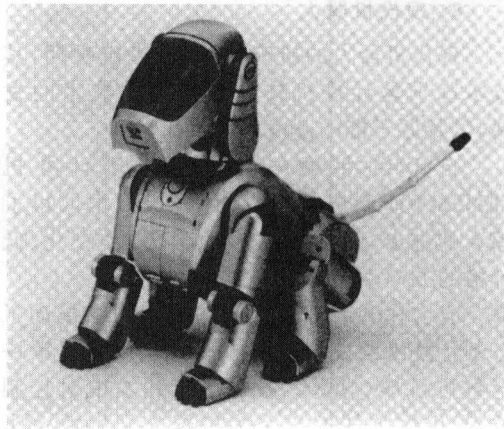


图 1.13 AIBO(索尼,1997)

表 1.2 机器人发展的大事年表

年代	实际模型	概 念	社会与文化
公元 前		27~26 世纪 宋史中的“黄帝的指南车”	45~25 世纪 4 大文明
	5 世纪 herodotos 的“假肢”	8 世纪 Homeros 的《伊利阿斯》中的“黄金少女”	
		3 世纪 《希腊神话》中阿鲁哥探险队的“青铜巨人塔罗斯 (Taloas)”	3 世纪 弥生文化
			33~32 Vitruvius 的《建筑学》
公元 后	1 世纪 Hero 的“自动门”和“自动圣水装置”		
	3 世纪 指南车(三国时代)	3 世纪 “戈莱姆”传说	
500	666 《日本书记》天智天皇,指南车		538 佛教传入
	850 《今昔物语》高阳亲王,灌溉玩偶	1012~1095 沈括的“梦溪笔谈”“喉咙”	
		1183 西行的《撰集抄》“仿人机械”	1192 镰仓幕府
1500	1510 达芬奇的“机械狮子”		14~16 世纪 文艺复兴
	1570 “组钟”		16 世纪前半叶 宗教改革
	16 世纪		1543 哥白尼的“地动说”

续表 1.2

年代	实际模型	概 念	社会与文化
	“庭院的水力自动装置”		
1600			1603 江户幕府
			1637 笛卡儿《方法谈》
			1656 惠更斯的“摆钟”
			1686 牛顿的《金色的苹果》
1700			
	1730 《机关启蒙鉴草》		
	1738 沃康松的“鸭子”		1747 拉·美特利的《人体机械论》
	1773 雅盖·德罗的“自动玩偶”		1774 杉田玄白的《解剖新书》
	1775 若井信亲的“捧杯玩偶”		
			1781 瓦特的蒸汽机
			18 世纪后半叶 工业革命
			1776 美国独立宣言
			1789~1794 法国大革命
	1796 《机巧图汇》		
1800			
			1808 间宫林藏的桦太探险
			1811~1812 卢德运动
			1816 再次发生卢德运动
		1818 Shelley 的《妖怪》	
		1831 歌德的《浮士德》	
		1836 Po 的《梅鲁茨鲁下象棋》	
		1867 霍夫曼的《葛蓓莉亚》	
			1868 明治维新
			1877

续表 1.2

年代	实际模型	概 念	社会与文化
1900	1893 莫尔的“蒸汽人”	1883 Collodi 的《木偶奇遇记》 1886 利拉丹的《未来的夏娃》	爱迪生发明留声机 1879 爱迪生发明电灯
			1914~1918 第一次世界大战
			1915 梅林的《戈雷姆》
1920		1920 Karel Capek 的 R. U. R 1924 R. U. R 在日本的筑地小剧场公演 1927 Fritz. Lang 的《大都市》	爱因斯坦提出广义相对论
			1929 世界经济危机
			1939~1945 第二次世界大战
1940	1945 左右 Parsons 的数字控制专利 1946 德沃尔的工业机器人专利 1947 阿尔贡研究所的“遥控机械手” 1948 阿尔贡研究所的“主从机械手”	1942 阿西莫夫的“Run-around”	1942 第二次世界大战
			1945 冯·诺依曼计算机设计思想
			1946 宾夕法尼亚大学的 ENIAC 计算机制造完成
1950	1951 MIT 的数控铣床	1950 阿西莫夫的《我是机器人》 1951 手塚治虫的《铁臂阿童木》	1948 维纳的《控制论》 香农的《信息论》
			1957 人造卫星上天

续表 1.2

年代	实际模型	概 念	社会与文化
1960	1959 德沃尔试制成功工业机器人 东京大学的“机械手指” 1961 MIT 机械手“MH-1” 1962 AMF 公司的“VERSATRAN”, UNIMATION 公司的“UNIMATE”机器人 1966 SRI 的“Shakey 机器人” 1968 斯坦福大学的“手眼系统” AIDA 公司的“自动手”		1964 东海道新干线通车 东京奥运会
			1969 阿波罗 11 号登月 1970 大阪国际博览会
			1973 日本产业机器人工业会成立
1980	1969 早稻田大学的“人工脚” 1970 日本电总研“ETL 机器人”, 日立公司的“手眼机器人” 1973 早稻田大学的“WABOT-1” 1977 电影“星球大战”C3-PO, R2-D2 1983~1991 日本通商产业省“极限作业机器人计划” 1985 住友电工·早稻田大学“WASUBOT”		1969 阿波罗 11 号登月 1970 大阪国际博览会 1973 日本产业机器人工业会成立 1977 电影“星球大战”C3-PO, R2-D2 1980 机器人元年 1983 日本机器人学会成立 1985 筑波国际科学博览会 1990 泡沫经济破灭 1995 阪神淡路大地震 1997 计算机“深蓝”战胜国际象棋世界冠军
			1996 本田“拟人机器人 P2” 1998~2003 日本经济产业

续表 1.2

年代	实际模型	概念	社会与文化
2000	省“拟人机器人计划 HRP” 1999 索尼“娱乐机器人 AIBO”		2001 美国“911”事件 2005 爱知国际博览会

今后,医疗、护理、娱乐、救援机器人、生物工业机器人等新机器人的研究开发将会不断取得新的进展。

菅野重树 加藤一郎*

1.3 工业机器人

1.3.1 什么是工业机器人^[1]

在 JIS B 0134:1998《工业机器人名词术语》中,工业机器人的定义是:一种能够通过自动控制来进行操作或移动,且由程序对各种作业进行控制的工业用机械。

对于工业上广泛应用的操作机器人(manipulating industrial robot),JIS 的定义为:3轴以上、可自动控制、能够再编程、移动或固定的通用操作机械。

由于这种机器人主要用于工业制造环境(manufacturing environment)中,所以也称为工业机器人。为了区别于普通机器人,将采用结点、传送带等方式构成的完成特定作业的控制回路称为固定顺序操作机(fixed sequence manipulator)。

工业机器人的分类、构造等,请参阅第7篇第2节的“工业机器人总论”。

1.3.2 工业机器人的历史

1. 工业机器人的诞生^[3]

第二次世界大战后,自动化技术得到了快速发展,并广泛应用于各个工业领域。但是,这时的自动化只限于简单作业,对于那些需要利用人的灵巧性、柔软适应性来完成的

作业,实现自动化的困难很大。在机械加工、装配、搬运等主要依靠手工操作的生产现场,人们仍然不得不忍受着噪声、高温、高湿,与其他机械一起从事单调重复的工作。

针对这种现状,为了实现由机械来完成单调重复工作,美国的德沃尔提出了示教再现控制装置的设想,并于1946年申请了专利。1954年,他设计出了世界上第一台可编程的机器人,将之命名为“Universal Automation”,后来将其缩写 Unimation 作为公司的名称。这种机器人是一种可编程的零部件操作装置,其工作方式为首先移动机械手的末端执行器,并记录下整个动作过程;然后,机器人反复再现整个动作的过程。

从1956年到1958年,Devol 和 Joseph F. Engelberger 对机器人商品化的相关问题进行了充分的调查,并于1959年生产出了机器人样机(按照现在的分类方法,属于极坐标机器人)。这就是第一台工业机器人 Unimate 诞生的经过(图1.14)。

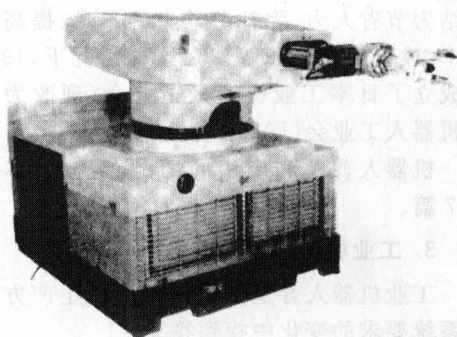


图 1.14 Unimate(Unimation, Inc.)

经过多次改进,1961年,通用(General Motors(GM))公司第一次使用3台 Unimate 机器人进行了压模铸造中金属零部件的装卡、取出作业试验,并于1964年在点焊生产线上正式投入了66台机器人。至此,机器人在汽车生产线上的有效性得到了验证,并成为机器人普及的契机。

1963年,AMF 公司根据 Harry Johnson 和 Veljko Milenkovic 的设计制造出了圆柱坐标机器人 Versatran(图1.15)。与 Unimate 采用数字控制不同,Versatran 采用的是模拟控制方式。这导致了二者在后来的市场占有率方面产生很大差异。

* 由菅野重树对1990年版的加藤·菅野共著的内容作了修改。

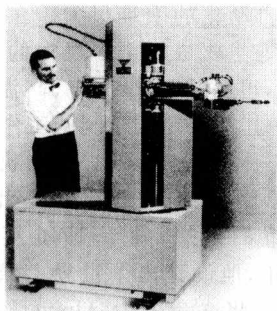


图 1.15 Versatran(AMF)

2. 日本工业机器人的黎明期^[2]

20 世纪 60 年代初期,基于限位开关、步进式继电器、插接板、二极管矩阵的可变序列控制式物料输送装置开始在日本汽车制造业中应用。1967 年,丰田织机引进了第一台机器人 Versatran;1968 年,川崎重工从 Unimation 公司取得了 Unimate 机器人的专利使用权。从此,工业机器人的开发以及产品化相继在日本各公司展开,并于 1970 年后开始迅速普及。机器人在日本普及的主要原因可以归结为节省人力、弥补劳动力的不足、提高生产率、改善工作环境等。在这种情况下,1972 年成立了日本工业机器人工业会(现改为日本机器人工业会(JARA))。

机器人普及和应用的情况,请参看本书第 7 篇。

3. 工业机器人与自动化^[2]

工业机器人普及的原因可以从生产方式对系统要求的变化中找到答案。

1913 年,福特公司实现了流水线生产方式。此后,随着自动机械的发展,用输送带将自动机械连接起来就形成了“连续流水作业”;随着技术的进一步发展,原来由人工完成的加工物放入取出作业也利用自动机械来实现,最终构成了连续自动生产线。但是,这种生产方式主要限于单一品种或有限种类产品的大量生产。至于多品种小批量生产,由于在一般机械加工厂中也占有很大比重,所以多品种小批量生产如何实现自动化就成为一个研究课题。

另外,随着经济的发展,当人们的生活水平达到一定程度后,消费者的需求开始变得多样化,生产批量减小,产品寿命缩短。这时,以单一产品大批量生产为目标的自动化

生产必将导致成本上升、投资效益降低。因而要求生产线易于调整以适应小批量多品种生产的需求。

生产方式的好坏决定着企业的生死存亡。生产系统“柔性”(可变程序性)概念的提出,成为该问题的解决方案,该概念的具体表现形式就是基于范式转变(Paradigm shift)的柔性自动化或者说工厂自动化(FA)。计算机系统、可编程控制器及工业机器人在其中起着重要的作用。

4. 工业机器人出现的技术背景

工业机器人是在下述技术背景下出现的。

1) 遥控操作^[3]

为了对核燃料进行远距离操作,1947 年美国阿尔贡国家实验室(Argonne National Laboratory)的 Ray Goertz 等开发了具有双向控制功能的机械式主从机械手(MSM: Master-Slave Manipulators)。该机械手能够感知来自操作对象的反力,因而操作者进行遥控操作时具有一定的临场感。20 世纪 50 年代,他们又开发出了用电气伺服机构将运动学相似的主机械手和从机械手联结起来的主从机械手。

机械手中机械系统的设计方法及机械手控制的有关研究,对工业机器人的机构开发和控制系统设计具有重要的作用。

2) 数控机床^[3]

数字控制(NC: Numerical Control)的概念是 20 世纪 40 年代由美国的约翰·帕森斯(John Parsons)在进行直升机机翼制造时提出来的。1949 年,在美国空军的资助下,John Parsons 与麻省理工学院(MIT)伺服机构研究所共同承担了开发基于计算机输出的机床位置控制系统的课题。

此后,由于各方面的原因,MIT 于 1951 年单独研制出了世界上第一台数控铣床。在进行加工之前,首先进行数值计算,并将得到的数据和加工顺序、加工条件等储存到存储器中(当时是纸带穿孔式),然后在计算机控制下进行自动加工。这就是 NC 机床(Numerical Controlled Machine Tool)的诞生经过。

据说,工业机器人的构想就是由德沃尔在这种技术开发的时代背景下提出的。这种

技术中的高速、高精度数字伺服机构成为工业机器人的基础技术之一。

3) 智能机器人研究^[4]

20世纪50年代末,随着计算机性能的提高和软件技术的进步,开始了人工智能技术的研究。其目标是使机器人能够像人一样具备思考和认知的能力,并能够自主地解决问题,进而使自身无法移动的计算机具备移动和操作功能,且能够根据计算机指令对外界实施操作。这就是智能机器人研究的开端。

如今,机器人语言、机器人传感器以及自适应运动控制等研究成果在工业机器人智能化方面发挥着重要的作用。尤其是视觉信息处理技术,已经在工业机器人的自适应化、智能化方面获得了应用。高级机器人语言、自动编程、传感器融合、学习等综合智能化技术的实用化,将对机器人应用领域的拓展,以及对机器人产业本身的发展产生举足轻重的影响。

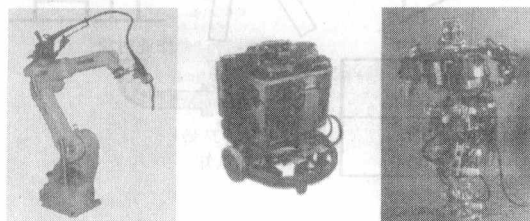
长谷川健介

1.4 机器人的构成及功能

前面就机器人的定义、历史以及工业机器人的发展历史进行了讲述。根据机器人的发展历程,可以将机器人分为以下三种基本类型:机械手即工业机器人,减少了空间约束的机器人即移动机器人,从仿人形机械研究衍生而来的拟人机器人。拟人机器人可以看作是从胳膊、手的“操作功能”,或者腿、车轮的“移动功能”进化来的,也可以说是以上两种功能的组合。

图1.16给出上述三种机器人的示例。将它们的功能组合,在图1.17中给出机器人基本功能构成的图示。

下面对各个功能加以简单介绍。



(a) 机械手 (神户制铁所) (b) 移动机器人 (筑波大学) (c) 拟人机器人 (早稻田大学)

图1.16 机器人的基本分类

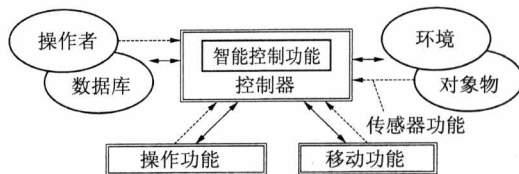


图1.17 机器人的功能构成

1. 操作功能

1) 操作机

相当于机器人的胳膊,由两个以上的连杆和关节构成。在操作时用于改变末端执行器的位置和姿态。又被称为机器人臂。

2) 末端执行器

直接进行操作作业的部分。其具体形式有很多,如夹持用的手部(工业机器人中也称为把持部、夹钳)等。工业机器人中的末端执行器多采用2个手指,而在拟人机器人中,大多采用3个手指或5个手指。

2. 移动功能

随着使用环境的不同,机器人的移动机构也是多种多样的,例如车轮移动机构、腿机构、空中和水中用的螺旋桨机构等。在工业机器人中还有在固定轨道上行走的机构。

1) 轮和履带

由于车轮移动方式具有效率高、易于实现高速运动等优点,所以在机器人上获得了广泛的应用。履带移动方式主要用于在不平整路面行走的工程车辆、农业车辆等。

2) 腿和脚

车轮、履带与移动面之间属于连续接触方式,而腿或脚与移动面之间则属于非连续接触方式。从机构来看,既有模仿人或动物,利用旋转关节组成的;也有旋转关节和滑动关节组合而成的。根据腿的数量来分,有2腿、4腿、6腿及6腿以上。

3) 特殊移动

特殊移动方式中,有模仿蛇爬行的肢体移动、模仿鱼游动的水中移动、还有模仿鸟飞翔的扑翼飞行机构等。

3. 控制

机器人控制装置的功能构成如图1.18所示。

1) 机器人系统管理部

相当于机器人系统的操作系统,用于与

上位系统之间的通信、任务程序的载入、下层功能的管理以及传感器信息的判断等。

2) 作业控制部

对以机器人语言表示的任务程序进行解释,将必要的信息传给动作控制部,使之按照预定的顺序和条件进行工作。

3) 动作控制部

搭载有控制程序,用于生成各轴的目标值以实现操作机或腿的运动轨迹。

4) 伺服部

使机器人机构的各轴按照目标值运动的反馈控制器。

4. 机器人传感器

为使机器人具有一定的适应能力,传感器是不可或缺的(图 1.19)。传感器可分为内部和外部传感器。前者用于检测关节角度、速度以及机器人自身倾角等;后者包括视觉和触觉传感器等。

下面简要介绍典型的机器人传感器。

1) 视觉传感器

视觉传感器在机器人中的应用包括测量和认知两个方面。测量是将视觉信息直接转换为数值并进行处理,而认知则是对视觉信息背后所包含的意义进行分析。前者主要用于形状、环境、自身位置等的测定,后者主要用于文字、平面图形、三维立体形状、人脸等的识别。

2) 触觉传感器

感知与外界之间接触的传感器。采用压敏导电橡胶的触觉传感器已经实用化,可作为单点测量的限位开关或用于分布压力的信息采集等。在今后人与机器人共存的社会中,通过面、线接触来对外部环境进行识别的高性能触觉传感器将是必不可少的。

3) 接近觉传感器

用于检测机器人与目标物之间的接近程

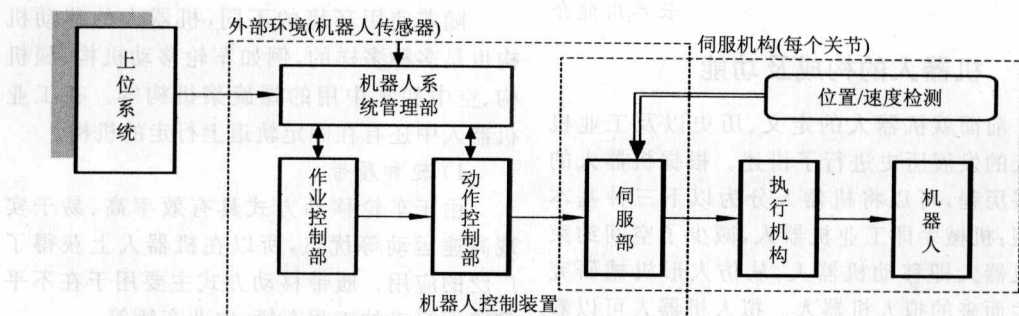


图 1.18 机器人控制装置的功能

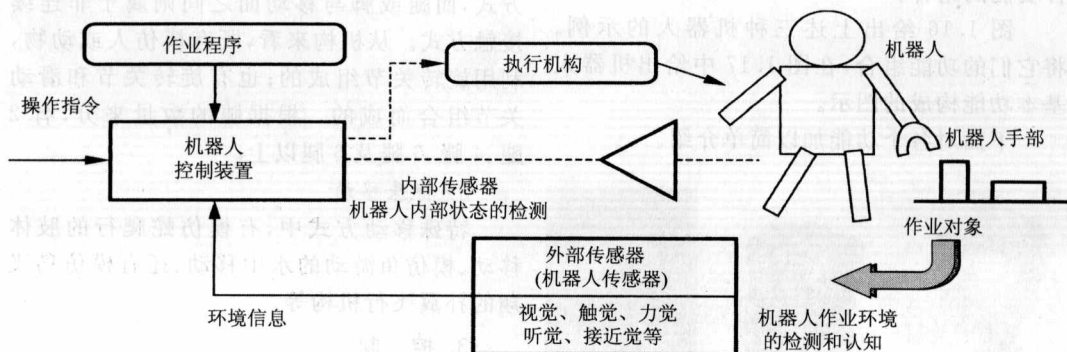


图 1.19 机器人传感器的布置

度。其典型代表是红外线传感器和超声波传感器。

4) 力/力矩传感器

一般安装于机器人的腕部、腿部或手指处,用于检测来自操作对象的反力/反力矩。这种传感器已在工业机器人领域广泛应用于力控制。

5. 机器人的自由度

JIS B 0134 对自由度的定义为:描述空间运动的刚体所需要的独立变量的个数(最大为6)。由于有时机械手的轴的数量与自由度之间的关系较为模糊,故在下面稍做说明。

机构学是机械工程学的基础,它包括机构运动分析(analysis of mechanisms)和机构综合(synthesis of mechanisms)。在构成机构的要素中,不存在相对运动的部分称为构件(link),两个以上构件相互约束且能够相对运动时,就形成了运动副(pair)。传统机构学的研究对象是由构件和运动副所构成的闭环机构。以机械手为代表的开环机构现在也成为它的研究对象。运动副自由度的定义^[1]为:能够确定两个构件相对位置的最小输入的个数。在机械手中,运动副被称为关节,包括移动关节、转动关节、圆柱关节、球关节等,其自由度分别为1、1、2、2。这些关节的不同组合方式即可构成各种各样的机器人。

不受外部约束的刚体具有6个自由度。当刚体的位置、姿态和运动在三维空间中用直角坐标来表示时,6个自由度分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴三个自由度,绕各轴的三个旋转自由度 α 、 β 、 γ (称为 Roll, Pitch, Yaw),如图 1.20 所示。如果用机械手来调整刚体的位置和姿态,则末端执行器应该具有6个自由度。在实际工作中,由于作业对象受到夹具的约束,所以,即使机械手的自由度小于6,仍然可以完成预定的工作。这与 JIS 的定义是一致的。当关节自由度之和大于机械手的自由度时,就说明机器人具有冗余自由度。

在《工业操作机器人坐标系及运动符号》(JIS B 8437:1999)中,对工业机器人的坐标系进行了定义。其中,固定在地面上的坐标系称为世界坐标系,即图 1.21 中的 $O_0-X_0-Y_0-Z_0$;固定在安装面上的坐标系称为基础坐

标系,即图 1.21 中的 $O_1-X_1-Y_1-Z_1$ 。对于固定安装的机器人,当安装完成后,坐标系之间的对应关系即唯一确定,两种坐标系之间的变换很容易进行。图 1.21 中的坐标系 $O_m-X_m-Y_m-Z_m$ 固定在安装末端执行器的机械接口处,称为机械接口坐标系(mechanical interface)。该坐标系与末端执行器坐标系 $O_t-X_t-Y_t-Z_t$ (图中未给出)具有对应关系。

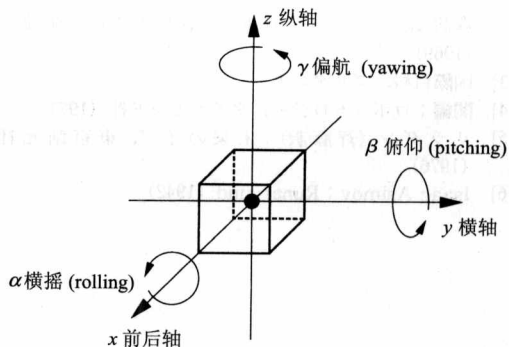


图 1.20 三维空间的运动

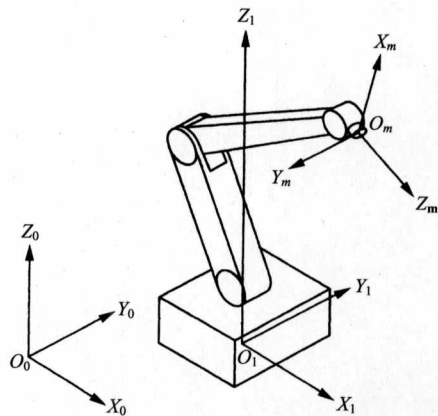


图 1.21 机器人坐标系的举例

对于移动机器人来说,基础坐标系和世界坐标系不具有——对应的关系。在航空领域中,固定在飞机上的机体轴系与固定在地面上的世界坐标系的关系也是如此。移动机器人也可以采用同样的方法进行分析。由于移动机器人与地面接触,它的运动自由度受到限制,而地面的平整度和强度等也对机器人的运动精度产生影响,因而难以实现实时高精度的坐标变换。随着机械手作业范围扩大和自由度增加,机械手与移动机构的结合将是必不可少的。因此,基于环境地图的位

第2章 数学基础

2.1 矩阵理论^[2]

2.1.1 矩阵、行列式和逆矩阵

1. 矩阵和向量

由元素 a_{ij} (为第 i 行第 j 列的元素) 排成的 n 行 m 列数表

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

称为 $n \times m$ 矩阵。记为 $\mathbf{A}(n \times m)$ 或 $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ 。所有元素都为实数的矩阵称为实矩阵。本书主要研究的是实矩阵。由于实矩阵可以看作实向量空间 R^m 向 R^n 的线性映射,故可写成 $\mathbf{A} \in R^{n \times m}$ 。

特别地, $m=n$ 的矩阵称为方阵, $n=1$ 的矩阵称为行向量, $m=1$ 的矩阵称为列向量。 $a_{ij}=1(i=j)$, $a_{ij}=0(i \neq j)$ 的方阵称为单位矩阵,记为 \mathbf{I} 或 \mathbf{I}_n (表明为 $n \times n$ 方阵)。非对角线上的元素为 0 的方阵称为对角方阵,记为 $\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 。其中, λ_i 表示对角元素 a_{ii} 。把矩阵 $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$ 的行和列对调所得矩阵 $\{a_{ji}\}$ 称为转置矩阵,记为 \mathbf{A}^T 。

$a_{ij}=a_{ji}$ 的方阵称为对称矩阵, $a_{ij}=-a_{ji}$ 的方阵称为反对称矩阵。任意方阵 \mathbf{A} 可以表示为矩阵 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 的和形式,即

$$\mathbf{A} = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2$$

式中, \mathbf{W}_1 为对称矩阵; \mathbf{W}_2 为反对称矩阵,且分别具有如下形式:

$$\mathbf{W}_1 = \frac{\mathbf{A} + \mathbf{A}^T}{2}, \quad \mathbf{W}_2 = \frac{\mathbf{A} - \mathbf{A}^T}{2}$$

2. 行列式

所谓行列式是由方阵定义的标量,记作 $\det|\mathbf{A}|$ 或 $|\mathbf{A}|$ 。行列式不为 0 的方阵称为正则矩阵。矩阵 $\mathbf{A}(n \times n)$ 的行列式按行展开时的计算式为

$$\det|\mathbf{A}| = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij}$$

按列展开的计算式为

$$\det|\mathbf{A}| = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} M_{ij}$$

上述两式称为拉普拉斯展开式。式中, M_{ij} 是矩阵 \mathbf{A} 中划去第 i 行第 j 列后所得到的 $(n-1) \times (n-1)$ 矩阵的行列式,称为余子式。

例如,二阶和三阶矩阵的行列式为

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \\ \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} &= a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} \\ &\quad + a_{13}a_{32}a_{21} - a_{13}a_{22}a_{31} \\ &\quad - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{32}a_{23} \end{aligned}$$

行列式具有如下性质:

- ① 行列式的两行(或两列)交换,其值变号。
- ② 把行列式某行(或某列)的常数倍加到另一行(或另一列),行列式的值不变。
- ③ 若 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 均为方阵,则 $\det|\mathbf{AB}| = \det|\mathbf{A}| \cdot \det|\mathbf{B}|$
- ④ $\det|\mathbf{A}| = \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n$ 。其中, λ_i 为矩阵 \mathbf{A} 的特征值(参阅 2.1.2 节)。
- ⑤ 对于分块方阵

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}; \mathbf{A}(n \times n), \mathbf{D}(m \times m), \mathbf{B}(n \times m), \mathbf{C}(m \times n)$$

有如下关系成立:

$$\det \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{cases} \det|\mathbf{A}| \cdot \det|\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}|, & \text{当 } \det|\mathbf{A}| \neq 0 \text{ 时} \\ \det|\mathbf{D}| \cdot \det|\mathbf{A} - \mathbf{BD}^{-1}\mathbf{C}|, & \text{当 } \det|\mathbf{D}| \neq 0 \text{ 时} \end{cases}$$

- ⑥ 对于 $\mathbf{B}(n \times m)$, $\mathbf{C}(m \times n)$, 如下关系成立:

$$\det|\mathbf{I}_n + \mathbf{BC}| = \det|\mathbf{I}_m + \mathbf{CB}|$$

3. 逆矩阵

若方阵 $\mathbf{A}(n \times n)$ 的行列式不为 0,且矩阵 \mathbf{X} 满足 $\mathbf{AX} = \mathbf{I}_n$, 或 $\mathbf{XA} = \mathbf{I}_n$, 则称 \mathbf{X} 为 \mathbf{A} 的逆

矩阵,记为 $X=A^{-1}$ 。

逆矩阵具有下列性质:

① 如方阵 A, B 的逆阵存在,则有

$$(AB)^{-1}=B^{-1}A^{-1}$$

② 若 $\det|A| \neq 0$, 则 $\det|A^{-1}|=1/\det|A|$ 。

③ 对于分块矩阵,有如下关系:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} A^{-1}+A^{-1}BS^{-1}CA^{-1} & -A^{-1}BS^{-1} \\ -S^{-1}CA^{-1} & S^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K^{-1} & -K^{-1}BD^{-1} \\ -D^{-1}CK^{-1} & D^{-1}+D^{-1}CK^{-1}BD^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中

$$S=D-CA^{-1}B, K=A-BD^{-1}C$$

其中,求逆的矩阵必须是正则矩阵。

④ 对于 $B(n \times m), C(m \times n)$, 下述关系成立:

$$(A+BC)^{-1}=A^{-1}-A^{-1}B(I_m+CA^{-1}B)^{-1} \cdot CA^{-1}$$

特别是,若 B 和 C 分别为列向量 $b(n \times 1)$ 和行向量 $c(1 \times n)$, 则可用如下的除式来计算:

$$(A+bc)^{-1}=A^{-1} \frac{A^{-1}bca^{-1}}{1+ca^{-1}b}$$

式中求逆的矩阵必须是正则矩阵。性质③,

④称为逆矩阵的增补命题,在系统分析和设计时经常用到。

4. 秩

如果矩阵 $A(n \times m)$ 存在非零的 $k+1$ 阶余子式,且所有高于 k 阶的余子式均为 0, 则称矩阵 A 的秩为 k , 记为 $\text{rank}(A)=k$ 。当 $k < n, k < m$ 时,有下列性质:

① A 的秩与矩阵线性无关的行数(或列数)相等。

② A 和 A^T 的秩相等。

③ A 的秩等于 $A^T A$ 或 AA^T 的非零特征值的个数。

④ 方阵 $A(n \times n)$ 的秩为 n 和 $\det|A| \neq 0$ 等价。

5. 广义逆矩阵

若 A 为方阵且其维数与秩不相等(非满秩),或 A 的行数和列数不相等,则其逆阵不存在。这时, A 可由列满秩矩阵(列数与秩相等) B 和行满秩矩阵 C 的乘积表示如下:

$$A=BC$$

矩阵

$$A^+=C^T(CC^T)^{-1}(B^TB)^{-1}B^T$$

称为 Moore Penrose 广义逆矩阵。该广义逆矩阵满足如下关系的唯一解:

$$AA^+A=A, A^+AA^+=A^+$$

$$(AA^+)^T=AA^+, (A^+A)^T=A^+A$$

特别是,若列满秩矩阵 $A(n \times m) (n \geq m)$

为 $C=I_m$, 则 A 的广义逆矩阵为

$$A^+=(A^TA)^{-1}A^T$$

这时,对应的代数方程 $Ax=b$ 不成立。下式

$$x=A^+b=(A^TA)^{-1}A^Tb$$

是使方程误差的欧几里得范数(参阅 2.2.1 节)

$$\|Ax-b\|$$

最小的最小二乘解。

另外,若行满秩矩阵 $A(n \times m) (m \geq n)$ 为 $B=I_n$, 则 A 的广义逆矩阵为

$$A^+=A^T(AA^T)^{-1}$$

此时,对应的代数方程式 $Ax=b$ 不成立。下式

$$x=A^+b=A^T(AA^T)^{-1}b$$

是使解 x 的欧几里得范数 $\|x\|$ 最小的最短距离解。

6. 向量和矩阵的微分

向量和矩阵的时间微分、积分定义分别为每个元素对时间的微分和积分。标量 α 对向量 $x(n \times 1)$ 的偏微分 $\partial\alpha/\partial x$ 定义为

$$\begin{bmatrix} \partial\alpha/\partial x_1 \\ \partial\alpha/\partial x_2 \\ \vdots \\ \partial\alpha/\partial x_n \end{bmatrix}$$

或

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial x_1}, \frac{\partial\alpha}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial\alpha}{\partial x_n} \right)$$

称 m 阶列向量函数 $f(x)$ 对 x 的偏微分 $\partial f/\partial x$ 为雅可比(Jacobian)矩阵,定义为

$$\begin{bmatrix} \partial f_1/\partial x_1, \partial f_2/\partial x_1, \dots, \partial f_m/\partial x_1 \\ \partial f_1/\partial x_2, \partial f_2/\partial x_2, \dots, \partial f_m/\partial x_2 \\ \vdots \\ \partial f_1/\partial x_n, \partial f_2/\partial x_n, \dots, \partial f_m/\partial x_n \end{bmatrix} (n \times m)$$

或

$$\begin{bmatrix} \partial f_1/\partial x_1, \partial f_1/\partial x_2, \dots, \partial f_1/\partial x_n \\ \partial f_2/\partial x_1, \partial f_2/\partial x_2, \dots, \partial f_2/\partial x_n \\ \vdots \\ \partial f_m/\partial x_1, \partial f_m/\partial x_2, \dots, \partial f_m/\partial x_n \end{bmatrix} (m \times n)$$

具体采用哪种定义,可根据研究内容来选择。例如使用前一个定义时,有

$$\frac{\partial(\mathbf{b}^T \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{b}, \quad \frac{\partial(\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{A}^T \mathbf{x},$$

$$\frac{\partial(\mathbf{A} \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{A}^T$$

而 $f(\mathbf{x})$ 的泰勒展开可表示为

$$f(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right) \Delta \mathbf{x} + \dots$$

2.1.2 特征值、特征向量和对角化

1. 一般情况

对于方阵 $\mathbf{A}(n \times n)$, 若非零向量 \mathbf{v} 满足

$$\mathbf{A} \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v} \text{ 或 } (\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}) \mathbf{v} = \mathbf{0}$$

则称 λ 为特征值, \mathbf{v} 为特征向量。特征值是特征方程

$$\det|\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}| = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

的 n 个根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 。当没有重复特征值时, 对应各个特征值的特征向量 $\mathbf{v}_1 \sim \mathbf{v}_n$ 线性无关。设

$$\mathbf{T} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n) (n \times n)$$

则 $\det|\mathbf{T}| \neq 0$ 。此时, 可将 \mathbf{A} 变换成如下的对角矩阵:

$$\mathbf{T}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

上述方法称为对角变换, \mathbf{T} 则称为对角变换矩阵。

当存在重复特征值 λ_i , 且重复度为 r_i 时, 设

$$\text{rank}(\lambda_i \mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = n - p_i$$

则当 $r_i = p_i$ 时, 可以和没有重复特征值时一样进行对角变换。这种矩阵 \mathbf{A} 称为单一结构。下面将要研究的对称矩阵即为单一结构。当 $r_i > p_i \geq 2$ 时, 可将矩阵 \mathbf{A} 变换成若当(Jordan)形式。所谓若当形式就是 p_i 个具有下述形式的若当块以对角形式组合而成的矩阵:

$$\begin{bmatrix} \lambda_i & 1 & & & 0 \\ & \lambda_i & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 1 \\ 0 & & & & \lambda_i \end{bmatrix}$$

一般, 若 \mathbf{T} 为任意正则矩阵, 则称 $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}$ 与 \mathbf{A} 相似, 其特征值、若当形式等均与 \mathbf{A} 相等。

2. 对称矩阵

\mathbf{A} 为对称矩阵时, 它的特征值和特征向量均为实数, 且无论特征值重复与否, 其特征向量始终正交 ($\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_j = 0, i \neq j$)。故能够利用前述对角变换矩阵进行对角变换, 同时用 \mathbf{T}^T 代替 \mathbf{T}^{-1} 。

特征向量的常数倍仍是特征向量。对于任意特征向量 \mathbf{v}_i , 若设正规化特征向量 \mathbf{u}_i 为:

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{v}_i}{(\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i)^{1/2}}$$

则 $\mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_i = 1$ 。由于 \mathbf{u}_i 与 \mathbf{u}_j 正交, 有 $\mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_j = 0$ 。

若设

$$\mathbf{T} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n)$$

于是就有 $\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{I}$ 成立, 即 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$ 。对角变换可以如下进行:

$$\mathbf{T}^T \mathbf{A} \mathbf{T} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

在这种情况下, 不必使用 \mathbf{T} 的逆矩阵。将满足 $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$, 即 $\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{T} \mathbf{T}^T = \mathbf{I}_n$ 的矩阵称为正交矩阵。

3. 二次型和正定矩阵

对称矩阵 \mathbf{A} 的标量函数 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 称为二次型。若二次型 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 在 $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ 时均为正 (>0), 称 \mathbf{A} 为正定矩阵; 若 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 为非负 (≥ 0), 称 \mathbf{A} 为半正定(准正定)矩阵, 分别用 $\mathbf{A} > \mathbf{0}, \mathbf{A} \geq \mathbf{0}$ 表示。若二次型 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 在 $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ 时均为负 (<0), 称 \mathbf{A} 为负定矩阵; 若 $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 为非正 (≤ 0), 称 \mathbf{A} 为半负定(准负定)矩阵, 分别用 $\mathbf{A} < \mathbf{0}, \mathbf{A} \leq \mathbf{0}$ 表示。当两个矩阵的差是正定矩阵时, 可记为 $\mathbf{A} - \mathbf{B} > \mathbf{0}$ 或 $\mathbf{A} > \mathbf{B}$ 。

\mathbf{A} 为正定、半正定、负定、半负定的充要条件是: \mathbf{A} 的所有特征值分别为正、非负、负、非正。矩阵 \mathbf{A} 是否为正定, 由薛尔瓦斯特(Sylvester)准则来判定, 即 \mathbf{A} 为正定的充要条件是所有顺序主子式大于零:

$$a_{11} > 0, \det \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \det|\mathbf{A}| > 0$$

由正定、半正定矩阵, 可知:

① 若 \mathbf{A} 为正定矩阵, 则二次型 $\mathbf{c} = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x}$ 为一超椭球面。

② 对于任意矩阵 $\mathbf{C}, \mathbf{C}^T \mathbf{C} \geq \mathbf{0}, \mathbf{C} \mathbf{C}^T \geq \mathbf{0}$ 成立。

③ 对于 $\mathbf{A} \geq \mathbf{0}$, 存在 $\mathbf{A}^{1/2} \geq \mathbf{0}$, 使 $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{1/2} \mathbf{A}^{1/2}$ 。

4. 二次型与主轴变换

当 $n=3$ 时, 以二次型表示的二次式 $1 =$

$x^T A x$ 为二次曲面。特别是 $A > 0$ 时, 为一椭球面。当 n 为一般情形时, 可表述如下:

首先由对称矩阵 A 的正规化特征向量 u_i 求对角变换矩阵(正交矩阵) $T = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, 然后, 通过 $x = Tz$ 把坐标 x 变换到 z (参阅 2.2.2 节), 于是

$$\begin{aligned} 1 &= x^T A x = z^T T^T A T z \\ &= z^T \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) z \\ &= \lambda_1 z_1^2 + \lambda_2 z_2^2 + \dots + \lambda_n z_n^2 \\ &= \frac{z_1^2}{1/\lambda_1} + \frac{z_2^2}{1/\lambda_2} + \dots + \frac{z_n^2}{1/\lambda_n} \end{aligned}$$

主轴即由特征向量 u_i 给出。若 $\lambda_i > 0$, 上式为一超椭球面, 主轴的长度主值为 $(1/\lambda_i)^{1/2}$ 。

图 2.1 给出了 $n=2$, $\lambda_2 > \lambda_1$ 的示例图。显然, 椭圆上的向量 x 的坐标值, 在原坐标系中为 (x_1, x_2) , 在主轴坐标系中为 (z_1, z_2) 。

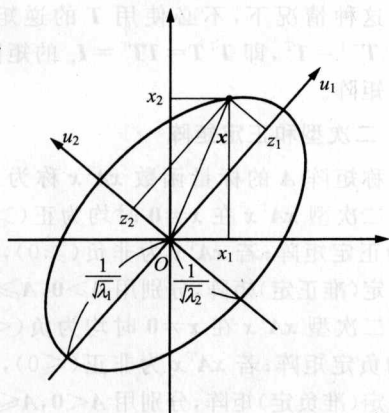


图 2.1 主轴变换($n=2$)

5. 奇异分解与奇异值

设有矩阵 $A(n \times m)$, 其秩 $\text{rank}(A^T A) = r$ (n 不一定等于 m), 则 $A^T A$ 有 r 个非零的正特征值, 且 $\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \dots \geq \sigma_r^2 > 0$ 。这时, A 可以写成下列形式:

$$A = U \Sigma V$$

其中,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r),$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$$

式中, $U(n \times n)$, $V(m \times m)$ 为正交矩阵。以上称为矩阵 A 的奇异分解, σ_i 称为 A 的奇异值。

利用对称矩阵 $A^T A$ 的对角变换矩阵(正交矩阵)可以求出矩阵 $U, V^{[1]}$ 。当 A 为半正

定矩阵时, σ_i 即为 A 的非零特征值。设 T 为对角变换矩阵, 则有 $U = T, V = T^T$ 。

特别地, $\sigma_1 \sim \sigma_n$ 中的最大值、最小值分别称为最大和最小奇异值, 分别记为 $\bar{\sigma}(A)$ 和 $\underline{\sigma}(A)$ 。此外, $\text{Cond}(A) = \bar{\sigma}(A) / \underline{\sigma}(A)$ 称为 $A(n \times n)$ 的条件数。

奇异值具有如下性质:

① 对于矩阵 $A(n \times n)$

$$\bar{\sigma}(A) = \frac{1}{\underline{\sigma}(A^{-1})}, \quad |\det A| = \sigma_1 \cdots \sigma_n$$

② $\bar{\sigma}(A+B) \leq \bar{\sigma}(A) + \bar{\sigma}(B)$

$$\bar{\sigma}(AB) \leq \bar{\sigma}(A) \bar{\sigma}(B)$$

这些性质常用于机器人的可操作性分析和鲁棒稳定性分析。

6. 矩阵的迹

称方阵 $A(n \times n)$ 的对角元素之和 $a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn}$ 为矩阵 A 的迹, 记为 $\text{tr}(A)$ 。由于矩阵对角元素之和等于特征值之和, 故迹也等于特征值之和。

矩阵相乘的顺序改变, 迹不变。即对于矩阵 $B(n \times m), C(m \times n)$, 有

$$\text{tr}(BC) = \text{tr}(CB)$$

故 $\text{tr}(T^{-1}AT) = \text{tr}(TT^{-1}A) = \text{tr}(A)$ 。同时可知, $\tilde{A} = T^{-1}AT$ 与 A 的迹相等。

当 T 为正交矩阵时, $\text{tr}(T^T A T) = \text{tr}(A)$ 意味着在张量分析中, 二阶张量的迹在坐标变换中是线性无关的标量。

2.1.3 复数矩阵

元素为复数的矩阵称为复数矩阵。满足 $\bar{A}^T = A$ 的复数矩阵 A 称为厄阵。这里的符号“ $\bar{}$ ”表示共轭复数。此外, 满足 $\bar{A}^T A = I$ 的矩阵称为酉阵。

厄阵 A 的特征值为实数。利用恰当的酉矩阵 T , 可使对角变换 $\bar{T}^T A T$ 成立。所有特征值均为正值的厄阵 A 称为正定厄阵。这与复数二次型 $\bar{x}^T A x$ 在 $x \neq 0$ 时均为正值是等价的。

2.2 向量空间^[3]

2.2.1 向量空间与线性映射

1. 向量空间与范数

满足下列条件的集合 X 称为向量空间, 而构成 X 的元素 x, y, z, \dots 称为向量。

① 向量 x, y 的加法满足 $x + y \in X$, 则以

下法则成立:

- a. $x+y=y+x$
- b. $(x+y)+z=x+(y+z)$
- c. 存在 $0 \in X$, 使 $0+x=x$
- d. 存在 $-x \in X$, 使 $x+(-x)=0$

② 向量 x 与实数域 K 中的任意数 $\alpha \in K$ 的乘积定义为 $\alpha x \in X$, 则以下法则成立:

- a. 对于 $1 \in K$ 和 $x \in X$, 有 $1x=x$
- b. 对于 $\alpha, \beta \in K, x \in X, \alpha(\beta x) = (\alpha\beta)x$
- c. $(\alpha+\beta)x = \alpha x + \beta x$
- d. $\alpha(x+y) = \alpha x + \alpha y$

当 K 取复数域时, X 为复向量空间; 当 K 取实数域时, X 为实向量空间。

例如, 连续函数的全体构成一个向量空间。本章所研究的 n 个元素的排列 $x(n \times 1)$ 所构成的集合也是一个典型的向量空间。以下仅研究实向量空间, 即 K 取实数域。

由向量空间的部分集合所构成的向量空间称为子向量空间。向量空间 X 的部分集合 V 构成子向量空间的充要条件是: 对于 $x, y \in V, \alpha \in K$, 有 $x+y \in V, \alpha x \in V$ 成立。

向量 $x_i (i=1 \sim p)$ 的数乘和 $\sum \alpha_i x_i$ 称为 $x_i (i=1 \sim p)$ 的线性组合。当向量 y 用 $x_i (i=1 \sim p)$ 的线性组合来表示时, 称 y 线性从属于 $x_i (i=1 \sim p)$ 。在向量集合 $x_i (i=1 \sim p)$ 中, 当任何一个向量都不能用其他向量的线性组合来表示时, 称这些向量线性独立。向量空间中线性独立向量的最大个数 n 称为空间的维数。以 n 维向量 $x(n \times 1)$ 为元素的向量空间 X 的维数为 n , n 个线性独立向量的集合称为向量空间的基底向量。

为了使向量空间具有实际意义, 引入了拓扑学的概念。首先, 使用范数来描述向量之间的接近程度或大小。范数满足下述条件:

$$\|x\| \geq 0, \|x\| = 0 \Leftrightarrow x=0$$

$$\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$$

$$\|x\| + \|y\| \geq \|x+y\|$$

其次, 为定义向量之间的正交性, 引入了内积概念。内积满足如下条件:

$$\langle x, y \rangle = \langle y, x \rangle$$

$$\langle x, y+z \rangle = \langle x, y \rangle + \langle x, z \rangle$$

$$\langle \alpha x, y \rangle = \alpha \langle x, y \rangle$$

$$\langle x, x \rangle \geq 0$$

其中,

$$\langle x, x \rangle = 0 \Leftrightarrow x=0$$

当 $\langle x, y \rangle = 0$ 时, 称向量 x, y 正交。范数 $\|x\| = \langle x, x \rangle^{1/2}$ 所构成的完备向量空间称为希耳伯特空间。此处所研究的有限维数向量空间总是完备的。定义了内积 $\langle x, y \rangle = x^T y$ 和欧几里得范数 $\|x\| = (x^T x)^{1/2}$ 的空间即为希耳伯特空间, 此处称实欧几里得空间, 记为 R^n 。

2. 线性映射

设有线性空间 X, Y , 对于任意 $x \in X$, 总有一个 $y \in Y$ 与之对应, 且矩阵 A 满足如下关系:

$$A(x_1 + x_2) = Ax_1 + Ax_2$$

$$A(\alpha x) = \alpha Ax$$

则称矩阵 A 为线性映射。有限维向量空间内的线性映射可以用矩阵来表示。如矩阵 $A(n \times m)$ 可以看作从 m 维向量空间 X 向 n 维向量空间 Y 的线性映射。

将线性映射 $A(n \times m)$ 分割成列向量

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$$

则由 $a_i (i=1 \sim m)$ 的线性组合所构成的向量全体称为 A 的值域, 用 $\text{Range}\{A\}$ 表示。 $\text{Range}\{A\}$ 称为 Y 的子向量空间, 其维数为 $\text{rank}\{A\}$ 。满足 $Ax=0$ 的向量 x 的全体称为零化空间, 记为 $\text{Null}\{A\}$ 。 $\text{Null}\{A\}$ 为 X 的子向量空间。 $\text{Null}\{A\}$ 的维数为 $m - \text{rank}\{A\}$ 。

相应地, 代数方程 $Ax=b$ 的一般解为

$$x = A^+ b + (I_m - A^+ A)c$$

式中, A^+ 为广义逆矩阵; $c \in R^m$ 为任意向量; $(I_m - A^+ A)c$ 为 $\text{Null}\{A\}$ 的元素。

值域与零化空间之间存在如下关系:

$$\text{Range}\{A\} \perp \text{Null}\{A^T\},$$

$$\text{Range}\{A\} \oplus \text{Null}\{A^T\} = Y$$

$$\text{Range}\{A^T\} \perp \text{Null}\{A\},$$

$$\text{Range}\{A^T\} \oplus \text{Null}\{A\} = X$$

式中, \perp 表示空间正交; \oplus 表示直和。

3. 线性映射的范数

从 X 向 X 的线性映射 A 的范数 $\|A\|$ 定义为

$$\|A\| = \max_{x \in X} \frac{\|Ax\|}{\|x\|}$$

于是, 下述关系成立:

$$\|Ax\| \leq \|A\| \|x\|, \|\alpha A\| \leq |\alpha| \|A\|$$

$$\|AB\| \leq \|A\| \|B\|, \|A+B\| \leq \|A\| + \|B\|$$

有一种范数 l_p ($0 \leq p \leq \infty$), 其中常用的有

l_1 范数:

$$\|x\|_1 = |x_1| + |x_2| + \cdots + |x_n|$$

$$\|A\|_1 = \max_j \sum_i |a_{ij}| \quad (\text{列和范数})$$

l_∞ 范数:

$$\|x\|_\infty = \max_i |x_i|$$

$$\|A\|_\infty = \max_i \sum_j |a_{ij}| \quad (\text{行和范数})$$

l_2 范数(欧几里得范数):

$$\|x\|_2 = \{|x_1|^2 + |x_2|^2 + \cdots + |x_n|^2\}^{1/2}$$

$$= \{x^T x\}^{1/2}$$

$$\|A\|_2 = \{\lambda_{\max}(A^T A)\}^{1/2} = \sigma(A)$$

这些范数在有限维向量空间中是等价的, 即

$$M\|x\|_p \leq \|x\|_q \leq L\|x\|_p$$

式中, 对于 p, q 的任意组合, 均存在相应的常数 M, L 。

以上范数中, 较为常用的是由内积导出的欧几里得范数 $\|\cdot\|_2$ 。

2.2.2 坐标变换

R^n 内的向量 a 可以用某一基底向量 v_1, v_2, \dots, v_n 和其上的坐标 x_1, x_2, \dots, x_n 表示如下:

$$a = \sum_{i=1}^n x_i v_i = (v_1, v_2, \dots, v_n) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

通常, 默认坐标系为笛卡尔坐标系即 $(v_1, v_2, \dots, v_n) = I_n$ 。

如果将上述坐标系 (v_1, v_2, \dots, v_n) 放到新的坐标系 (u_1, u_2, \dots, u_n) 中, 且用新的坐标 z_1, z_2, \dots, z_n 来表示向量 a , 这个过程称为坐标变换, 如图 2.2 所示。其中, $u_1 \sim u_n$ 线性无关。

首先, 新基底向量 u_i ($i=1 \sim n$) 用旧坐标向量 v_i 的线性组合来表示:

$$u_i = a_{1i}v_1 + a_{2i}v_2 + \cdots + a_{ni}v_n$$

将上述关系整理后, 可写成以下形式:

$$(u_1, u_2, \dots, u_n) = (v_1, v_2, \dots, v_n)A$$

其中, $A = \{a_{ij}\}$, A 称为坐标变换矩阵。对于 a 来说, 有下述关系成立:

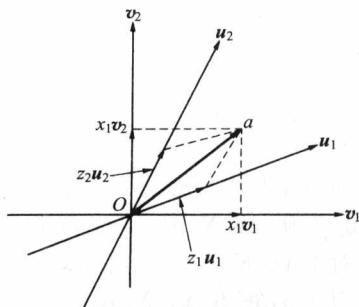


图 2.2 坐标变换 ($n=2$)

$$a = (u_1, u_2, \dots, u_n) \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

$$= (v_1, v_2, \dots, v_n) A \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

$$= (v_1, v_2, \dots, v_n) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$\text{设旧坐标: } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \text{ 新坐标: } z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

则

$$x = Az$$

或

$$z = A^{-1}x$$

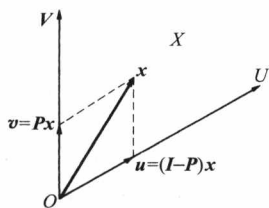
一定成立。即新坐标等于坐标变换矩阵 A 的逆阵与旧坐标 x 的乘积。

若 v_i ($i=1 \sim n$), u_i ($i=1 \sim n$) 均为正规正交系, 则 A 为正交矩阵。由 $A^{-1} = A^T$ 可得

$$z = A^T x$$

2.2.3 投影与投影矩阵

满足 $P^2 = P$ 的方阵 P 称为投影矩阵。设 $\text{Range}\{P\} = V$, $\text{Null}\{P\} = U$, $X = V \oplus U$, 则 P 表示向量空间 X 内的任意向量 x 沿着 U 向 V 上投影。如图 2.3 所示, 对于 X 内的任意向量 $x = v + u$; $v \in V, u \in U$, 式 $Px = v$ 成立。

图 2.3 投影矩阵 P

$Q = I - P$ 也满足 $Q^2 = Q$, 且 $\text{Range}\{Q\} = U$, $\text{Null}\{Q\} = V$ 。因此 $Q = I - P$ 为 X 内的向量沿 V 向 U 投影的投影矩阵。

设 V, U 为 R^n ($R^n = V \oplus U$) 内两个线性无关的子向量空间, 矩阵 $\tilde{V}(n \times r)$ 、 $\tilde{U}(n \times n-r)$ 分别表示某坐标系中 V, U 的基底向量集合, 则矩阵 P, Q 可分别记为

$$P = \tilde{V}(\tilde{V}^T \tilde{V})^{-1} \tilde{V}^T, \quad Q = \tilde{U}(\tilde{U}^T \tilde{U})^{-1} \tilde{U}^T$$

特别是, 当 U 为 V 的正交补空间^[1]时, P 为 V 上的正投影。这时, 不必使用 \tilde{U}, P, Q 可表示为

$$P = \tilde{V}(\tilde{V}^T \tilde{V})^{-1} \tilde{V}^T, \quad Q = I_n - \tilde{V}(\tilde{V}^T \tilde{V})^{-1} \tilde{V}^T$$

投影矩阵的特征值为 1 或 0。

美多 勉

2.3 向量分析

在机构或机器人的三维运动解析中, 向量概念是必不可少的。下面从几何学的角度对三维欧氏空间中的向量加以研究。设 e_1, e_2, e_3 为三维欧氏空间 E^3 中的正规正交基底向量(右手规则)(图 2.4(a)), 若向量 a, b 为

$$a = \sum_{i=1}^3 a_i e_i, \quad b = \sum_{i=1}^3 b_i e_i$$

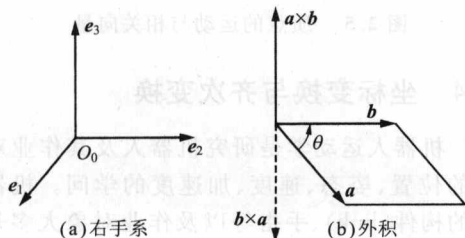


图 2.4 右手规则和向量的外积

则可写成如下形式:

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

为节省空间, 也可写成 $a = [a_1, a_2, a_3]^T$,

$b = [b_1, b_2, b_3]^T$ 。这里, T 表示向量的转置。

2.3.1 内积

两个向量的内积(数乘积)定义为

$$a \cdot b = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \cdots + a_n b_n = \sum_{i=1}^n a_i b_i$$

或表示为 $\langle a, b \rangle$ 。设向量 a, b 的夹角为 θ , 则内积可表示为

$$a \cdot b = \|a\| \|b\| \cos \theta$$

其中, $\|\cdot\|$ 为向量的欧几里得范数。若 a, b 在几何上是垂直的, 则其内积为零。反之, 当 a, b 的内积为零时, 下述两种情况必有一个成立:

- ① a 与 b 垂直;
- ② a, b 中至少有一个为零向量。

关于内积, 有以下关系成立:

$$a \cdot a = \|a\|^2$$

$$\|a+b\|^2 = \|a\|^2 + \|b\|^2 + 2(a \cdot b)$$

$$(a \cdot b)^2 \leq \|a\|^2 \|b\|^2$$

$$a \cdot a = 0 \Leftrightarrow a = 0$$

同时, 交换律、分配律及数乘结合律也同样成立:

$$a \cdot b = b \cdot a$$

$$a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c$$

$$(b+c) \cdot a = b \cdot a + c \cdot a$$

$$(ma) \cdot b = a \cdot (mb) = m(a \cdot b)$$

式中, m 为实数。

2.3.2 外积

与向量 a, b 正交, 且大小等于以 a, b 为相邻两边的平行四边形面积的向量(图 2.4)称为向量 a 与 b 的外积, 或称向量积, 用 $a \times b$ 表示。外积的方向根据右手规则定义, 即指向由 a 向 b 转动时的右螺旋线方向(沿着小于 180° 的角度)。且有以下关系成立:

$$\|a \times b\| = \|a\| \|b\| \sin \theta$$

式中, θ 为 a 与 b 的夹角。用行列式可表示为

$$a \times b = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix} e_1 + \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ b_3 & b_1 \end{vmatrix} e_2 + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} e_3$$

若用斜对称(交叉)矩阵与向量的乘积表示时, 则为

$$a \times b = \begin{bmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{b}$$

外积满足交换律,即

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a}$$

同时还满足分配律和数量积结合律,即

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$$

$$(\mathbf{b} + \mathbf{c}) \times \mathbf{a} = \mathbf{b} \times \mathbf{a} + \mathbf{c} \times \mathbf{a}$$

$$(m\mathbf{a}) \times \mathbf{b} = \mathbf{a} \times (m\mathbf{b}) = m(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

若 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 在几何上是平行的,其外积为零。

反之,若 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的外积为零时,下述两种情况必有一个成立:

① \mathbf{a} 与 \mathbf{b} 平行。

② \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 中至少有一个为零向量。

2.3.3 多重积

3个以上向量之间的运算可以采用内积或外积进行。

首先考虑 \mathbf{a} 与 $\mathbf{b} \times \mathbf{c}$ 的内积 $\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$ 。由于 $\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$ 为标量,因此称为 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 的标量三重积。这时,以下关系成立:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) &= \mathbf{b} \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \\ &= (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \cdot \mathbf{a} = (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) \cdot \mathbf{b} \\ &= (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c} \end{aligned}$$

标量三重积的数值等于以 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 为相邻3条棱边的平行6面体的体积。标量三重积的值为正或为负,分别表示 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 构成的是右手系还是左手系。当三重积为零时,则表示3个向量共面。

下面研究 \mathbf{a} 与 $\mathbf{b} \times \mathbf{c}$ 的外积。 $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$ 为向量,称为 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 的向量三重积。此时,以下关系成立:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c}$$

对于向量三重积,以下结合律不成立:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \neq (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c}$$

但雅克比法则成立,即

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) + \mathbf{b} \times (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) + \mathbf{c} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \mathbf{0}$$

利用三重积的性质,还可求出以下的多重积的关系:

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) = (\mathbf{a} \times \mathbf{b} \cdot \mathbf{d})\mathbf{c} - (\mathbf{a} \times \mathbf{b} \cdot \mathbf{c})\mathbf{d}$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) &= \mathbf{a} \cdot [\mathbf{b} \times (\mathbf{c} \times \mathbf{d})] \\ &= \mathbf{a} \cdot [(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d})\mathbf{c} - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})\mathbf{d}] \\ &= (\mathbf{b} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) \\ &\quad - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}) \end{aligned}$$

2.3.4 向量的种类

具有大小和方向,只考虑始点和终点相对位置的向量称为自由向量。如果向量必须考虑始点位置,则称为束缚向量。如物体(刚体)边界的法线向量即为自由向量,而力向量不仅需要考虑大小和方向,还要考虑作用点,故为束缚向量。

此外,像位置、速度、力那本身具有确定方向性的向量,称为极向量,而像角速度、力矩、面积那样,其方向由定义来加以确定的向量,称为轴向量(准向量)。两个极向量的外积为轴向量,两个轴向量的外积还是轴向量。极向量与轴向量的外积为极向量。

下面以图2.5为例说明质点 P (质量 m) 以角速度 ω 绕某旋转轴旋转的情况。从 P 向旋转轴做垂线,其垂足为 O 。向量 \overrightarrow{OP} 用 \mathbf{r} 表示。这里,角速度 ω 是轴向量,向量 \mathbf{r} 是极向量。质点的速度 \mathbf{v} 为 $\mathbf{v} = \omega \times \mathbf{r}$ 。这说明轴向量与极向量的外积为极向量。下面来分析质点绕旋转轴的角动量。质点所具有的动量 $m\mathbf{v}$ 为一个极向量。绕旋转轴的角动量为 $\mathbf{H} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$ 。可见,两个极向量 \mathbf{r} 与 $m\mathbf{v}$ 的外积为轴向量。

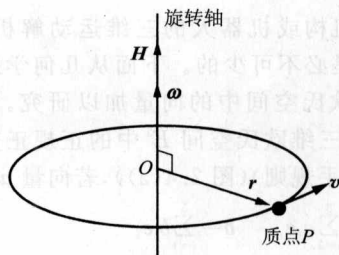


图2.5 质点的运动与相关向量

2.4 坐标变换与齐次变换

机器人运动学是研究机器人及其作业对象的位置、姿态、速度、加速度的学问。机器人的构件(link)、手指等以及作业对象大多是刚体,因此,刚体运动的描述就成为运动学的基础。为了表示运动刚体的位置和姿态,必须定义基准坐标系。

在基准坐标系中描述位置、姿态的量还需要变换到别的坐标系。坐标系的位置和姿态是利用其原点位置坐标和各坐标轴向量的方向来描述的,故机器人各部分及作业对象

的运动可以直接用坐标系来描述。本节以刚体运动描述为目的对坐标变换的方法加以说明。下文中的坐标系均是在三维欧氏空间 E^3 中按照右手规则定义的。

2.4.1 齐次变换与齐次坐标

首先分析三维空间中两个坐标系之间以及其中的点 R 之间的关系(图 2.6)。设基准坐标系 $\Sigma_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$ 坐标轴的正规正交向量分别为 x_0, y_0, z_0 , 则点 R 可表示为

$$(x_0, y_0, z_0)r_0 = r_{0x}x_0 + r_{0y}y_0 + r_{0z}z_0$$

式中, $r_0 = [r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}]^T$ 。同样, 在坐标系 $\Sigma_1(O_1, x_1, y_1, z_1)$ (以下称为坐标系 1)中, 利用位置向量 $r_1 = [r_{1x}, r_{1y}, r_{1z}]^T$, 点 R 可表示为

$$(x_1, y_1, z_1)r_1 = r_{1x}x_1 + r_{1y}y_1 + r_{1z}z_1$$

式中, x_1, y_1, z_1 为准坐标系中表示的坐标系 1 各个坐标轴的正规正交向量。

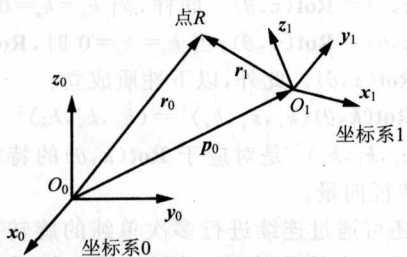


图 2.6 基准和运动坐标系中的空间点

设 x_1, y_1, z_1 为坐标系 0 中表示的坐标系 1 各个轴的方向余弦, p_0 为坐标系原点的位置向量, 则

$$r_0 = [x_1, y_1, z_1]r_1 + p_0$$

式中, $[x_1, y_1, z_1]$ 是由向量 x_1, y_1, z_1 构成的 3×3 矩阵, 用于描述坐标系 1 相对于坐标系 0 旋转。上式中包含了矩阵运算和加法运算, 非常不方便。为此, 可用如下的 4×4 矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [x_1, y_1, z_1] & p_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

此式称为齐次变换。表示齐次变换的 4×4 矩阵称为齐次变换矩阵。通常, 齐次变换矩阵用 T 或 T_1 来表示。其中, 左上角的数字表示基准坐标系, 右下角的数字表示变换坐标系。齐次变换矩阵既能进行坐标变换, 也能在基准坐标系中对其他坐标系进行描述。

齐次变换中的 4×1 位置向量称为齐次

坐标。该向量中的第 4 项通常为 1。当然也可以取其他的非零数值, 此时成为放大因子, 即表示 $[a, b, c, w]^T$ 和 $[a/w, b/w, c/w, 1]^T$ 是同一向量(这里, $w \neq 0$)。 $[0, 0, 0, w]^T$ 定义为坐标系的原点。但向量 $[0, 0, 0, 0]^T$ 无意义。此外, $[a, b, c, 0]^T$ 为无限大向量, 只用于表示向量的方向。对于一个数值有限的向量, 无论其数值有多大, 与该向量相加时, 向量的方向都不会发生不变。该方向向量也可通过齐次变换而变换到其他坐标系中。

2.4.2 齐次变换矩阵的构成要素

下面来分析齐次变换矩阵的含义。

第 4 列表示指向变换坐标系原点的位置向量。矩阵左上的 3×3 子矩阵表示基准坐标系 Σ_0 向坐标系 Σ_1 的旋转变换, 称为旋转矩阵, 可以表示成如下形式:

$$\text{Rot} = [x_1, y_1, z_1] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

旋转矩阵也可以写作 ${}^0\text{Rot}_1$ 。与齐次变换矩阵一样, 左上角的数字表示基准坐标系, 右下角的数字表示变换坐标系。

旋转矩阵的各个列向量为正规正交向量, 满足如下关系:

$$x_1^T y_1 = 0, y_1^T z_1 = 0, z_1^T x_1 = 0$$

$$\|x_1\| = 1, \|y_1\| = 1, \|z_1\| = 1$$

利用上述性质, 可以导出如下关系:

$$\begin{aligned} \text{Rot}^T \text{Rot} &= \begin{bmatrix} x_1^T x_1 & x_1^T y_1 & x_1^T z_1 \\ y_1^T x_1 & y_1^T y_1 & y_1^T z_1 \\ z_1^T x_1 & z_1^T y_1 & z_1^T z_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

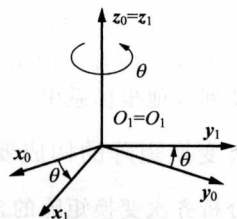
即 $\text{Rot}^T = \text{Rot}^{-1}$ 。由该关系可以很容易地求出逆矩阵, 在求坐标系 Σ_0 向坐标系 Σ_1 的旋转矩阵时常常用到。

设绕基准坐标系各个轴将坐标系旋转得到坐标系 1, 下面用图 2.7 来说明基准坐标系和坐标系 1 之间旋转矩阵的计算方法。当旋转角 $\theta = 0$ 时, 两坐标系完全重合。当绕 z 轴旋转时(图 2.7(a)), 坐标系 1 的各轴在基准坐标系中的方向余弦分别为

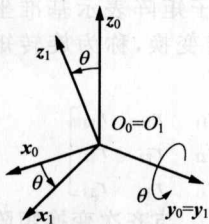
$$x_1 = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y_1 = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

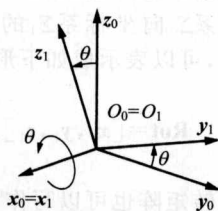
$$z_1 = (x_0, y_0, z_0) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



(a) 绕z轴的旋转



(b) 绕y轴的旋转



(c) 绕x轴的旋转

图 2.7 关于坐标系各轴的旋转变换

整理以上三个式子,得出绕 z 轴的旋转变换为

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) \text{Rot}(z, \theta)$$

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同样,如图 2.7(b)所示,将基准坐标系绕其 y 轴旋转 θ 角度得到坐标系 1,其旋转变换为

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) \text{Rot}(y, \theta)$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

图 2.7(c)中,将基准坐标系绕其 x 轴旋转 θ 角度而得到坐标系 1,其旋转变换为

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) \text{Rot}(x, \theta)$$

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

一般来说,在机械手各个关节的坐标系中,都是将关节旋转轴或移动运动方向定义为坐标系的特定坐标轴(在 Denavit-Harten-

berg 法中定义为 z 轴)。故上述旋转变换矩阵常常会被引用。不过,为了描述空间物体的姿态,也有很多场合需要坐标系绕任意轴旋转。图 2.8 中坐标系绕任意向量 k 旋转 θ 角度时,其旋转变换可以表示成如下形式:

$$\text{Rot}(k, \theta) = \begin{bmatrix} k_x k_x v\theta + c\theta & k_x k_y v\theta - k_z s\theta & k_x k_z v\theta + k_y s\theta \\ k_x k_y v\theta - k_z s\theta & k_y k_y v\theta + c\theta & k_y k_z v\theta - k_x s\theta \\ k_x k_z v\theta - k_y s\theta & k_y k_z v\theta + k_x s\theta & k_z k_z v\theta + c\theta \end{bmatrix}$$

式中, $k = (k_x, k_y, k_z)^T$, $\|k\| = 1$ 为旋转轴向量。原点重合的任意两个坐标间的关系,有时可以看作绕等价旋转轴的旋转,此时 k 称为等价旋转轴。式中 $c\theta = \cos\theta$, $s\theta = \sin\theta$, $v\theta = 1 - \cos\theta$ 。 θ 的符号根据 k 的方向按右螺旋法则确定。当 $k_x = k_y = 0$ 时,向量 k 与 z 轴重合, $\text{Rot}(k, \theta) = \text{Rot}(z, \theta)$ 。同样,当 $k_x = k_z = 0$ 时, $\text{Rot}(k, \theta) = \text{Rot}(y, \theta)$; 当 $k_y = k_z = 0$ 时, $\text{Rot}(k, \theta) = \text{Rot}(x, \theta)$ 。此外,以下性质成立:

$$\text{Rot}(k, \theta) (k_x, k_y, k_z)^T = (k_x, k_y, k_z)^T$$

即, $(k_x, k_y, k_z)^T$ 是对应于 $\text{Rot}(k, \theta)$ 的特征值 1 的特征向量。

还可通过连续进行多次单纯的旋转变换来描述一次等价旋转。例如,某坐标系绕向量 k 旋转 θ 所得到的姿态存在如下解:

$$\text{Rot}(k, \theta) = \text{Rot}(k_1, \theta_1) \text{Rot}(k_2, \theta_2)$$

不过这并不是唯一解。在描述三维欧氏空间内的任意旋转时,常用到 3 个固定角,或者说三个欧拉角。这里需要注意的是,分解成的几个旋转变换,只要旋转轴不全是空间平行的,在一般情况下,旋转顺序不同旋转变换的结果也不同,即

$$\begin{aligned} \text{Rot}(k_1, \theta_1) \text{Rot}(k_2, \theta_2) \\ \neq \text{Rot}(k_2, \theta_2) \text{Rot}(k_1, \theta_1) \end{aligned}$$

齐次变换矩阵也具有同样的性质。

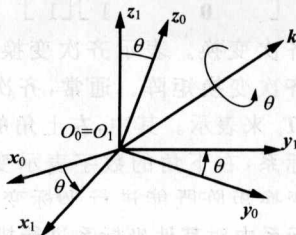


图 2.8 绕一般等价旋转轴的坐标旋转

2.4.3 坐标变换和运动描述

绕坐标轴旋转的齐次变换矩阵,可通过在旋转矩阵中加上第4行和第4列而得到,即

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

绕任意轴旋转时也是如此。当只有移动运动时,齐次变换矩阵变为

$$\text{Trans}(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

利用前述旋转变换的逆变换,即可求出如下齐次变换的逆变换:

$$\begin{aligned} {}^0T_1^{-1} &= {}^1T_0 = \begin{bmatrix} \text{Rot}^{-1} & -\text{Rot}^{-1}p_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \text{Rot}^T & -\text{Rot}^T p_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

齐次变换在机器人领域中的应用主要体现在两个方面:第一,作为坐标之间的变换矩阵,将某一坐标系中的向量在另一个坐标系中表示出来,如机器人的运动学、动力学分析,以及视觉传感等;第二,描述坐标系和向量的运动,如机器人的动作分析。

在求齐次变换矩阵时,往往需要计算多个齐次变换矩阵的积。但在上述两种场合,变换积的计算方法不同。

下面以 n 自由度的串联机械手为例进行说明。假设坐标系 $\mathcal{S}_0(O_0, x_0, y_0, z_0)$ 为固定于机械手基础上的绝对坐标系,坐标系 $\mathcal{S}_i(O_i, x_i, y_i, z_i)$ 为固定于第 i 个连杆上的连杆坐标系。当 $i=n$ 时,坐标系 $\mathcal{S}_n(O_n, x_n, y_n, z_n)$ 为末端坐标系。坐标间的直线或旋转变换用齐次变换 T_i 来进行。下面的向量中,左上角数字表示基准坐标系。

首先介绍某坐标系中的向量在其他坐标系中的表示。这里的向量为 4×1 位置向量 $v = [v_x, v_y, v_z, 1]^T$ 。设某点 r 在第一个构件坐标系 \mathcal{S}_1 中的位置向量为 1r , 则其在绝对坐标系 \mathcal{S}_0 中为 ${}^0r = {}^0T_1 {}^1r$ 。若设该点在坐标系 \mathcal{S}_2 中的位置向量为 2r , 它在坐标系 \mathcal{S}_1 中为 ${}^1r = {}^1T_2 {}^2r$, 而在绝对坐标系 \mathcal{S}_0 中则为 ${}^0r = {}^0T_1 {}^1r = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2r$ 。同样,末端坐标系 \mathcal{S}_n 中的位置向量 nr 在绝对坐标系中表示为 ${}^0r = {}^0T_n {}^nr$ 。这里, ${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \cdots {}^{n-2}T_{n-1} {}^{n-1}T_n$ 。

其次,介绍如何利用齐次变换描述坐标系和向量的运动。这里研究的问题是当绝对坐标系 \mathcal{S}_0 中的向量 0v 跟随机械手运动之后,在绝对坐标系中它将如何变化? 当向量 v 的运动对应于 \mathcal{S}_0 向 \mathcal{S}_1 的坐标变换时,向量在固定坐标系中为 ${}^0v_1 = {}^0T_0 {}^0v$ 。而当向量的运动对应于 \mathcal{S}_1 向 \mathcal{S}_2 的坐标变换时,有 ${}^0v_2 = {}^1T_2 {}^0v_1 = {}^2T_1 {}^0T_0 {}^0v$ 。依此类推,使向量一直运动到末端坐标系,于是, ${}^0v_n = {}^nT_0 {}^0v$ 。最后,变换矩阵将成为各个运动的齐次变换矩阵之积,即 ${}^nT_0 = {}^nT_{n-1} {}^{n-1}T_{n-2} \cdots {}^2T_1 {}^1T_0$ 。需要注意的是,这里的矩阵积与前述坐标变换时的顺序相反。

以上的齐次变换只是空间变换的一种形式,仅用直线和旋转来描述。一般的空间变换与上述齐次变换具有同样的形式(4×4 矩阵),但可进行扩大、缩小等变换。只是齐次变换矩阵左上角的 3×3 部分矩阵(旋转变换)不再满足 $\text{Rot}^T = \text{Rot}^{-1}$ 。这种变换在视觉传感中常作为透视变换矩阵使用。详细内容参见文献[3]。

王志东 小菅一弘

2.5 解析几何

机器人位于三维欧氏空间中。机器人运动时,往往要求采用某种模型来描述机器人的外部边界,并检查机器人构件之间,以及构件与周围环境的物体之间是否发生干涉,计算相互间的最短距离等。为此,需要解决各种各样的解析几何问题。其中许多问题利用高中数学就可以求解。但在机器人及作业环境中,面的数量非常多,且多为自由曲面,因而问题的求解非常复杂。为此,本节在整理相关问题的基础上,介绍一些有关的数学基础和几何算法。

2.5.1 基础知识

1. 直线

通过点 $P_1 = (p_1, q_1, r_1)$ 且与方向向量 (l_1, m_1, n_1) 平行的直线的方程为

$$\frac{x-p_1}{l_1} = \frac{y-q_1}{m_1} = \frac{z-r_1}{n_1} \quad (2.1)$$

为了简化距离计算公式(将在后面出现),在解析几何中,将方向向量的长度全部设为1。通过两点 $P_1, P_2 = (p_2, q_2, r_2)$ 的直线为

$$\frac{x-p_1}{p_2-p_1} = \frac{y-q_1}{q_2-q_1} = \frac{z-r_1}{r_2-r_1} \quad (2.2)$$

当 $P_1 = P_2$ 时,最左边可以用 $x = p_1$ 来代替。 $q_1 = q_2$ 和 $r_1 = r_2$ 时与此相同。从点 $P_0 = (p_0, q_0, r_0)$ 向式(2.1)的直线所作垂线的长度,即 P_0 与直线的距离 d_1 可由下式算出:

$$d_1 = [(p_0 - p)^2 + (q_0 - q)^2 + (r_0 - r)^2 - (l_1(p_0 - p) + m_1(q_0 - q) + n_1(r_0 - r))^2]^{1/2} \quad (2.3)$$

而垂足坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= p_1 + l[l(p_0 - p_1) + m(q_0 - q_1) + n(r_0 - r_1)] \\ y &= q_1 + m[l(p_0 - p_1) + m(q_0 - q_1) + n(r_0 - r_1)] \\ z &= r_1 + n[l(p_0 - p_1) + m(q_0 - q_1) + n(r_0 - r_1)] \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

式(2.1)的直线与通过点 P_2 且与方向向量 (l_2, m_2, n_2) 平行的直线之间公垂线的长度,即两直线间的最短距离 d_2 由下式给出:

$$d_2 = [(m_1 n_2 - m_2 n_1)(p_2 - p_1) + (n_1 l_2 - n_2 l_1)(q_2 - q_1) + (l_1 m_2 - l_2 m_1)(r_2 - r_1)] / [(m_1 n_2 - m_2 n_1)^2 + (n_1 l_2 - n_2 l_1)^2 + (l_1 m_2 - l_2 m_1)^2]^{1/2} \quad (2.5)$$

2. 平面

通过点 P_1 且与方向向量 (l_1, m_1, n_1) 垂直的平面由下式给出:

$$l_1(x - p_1) + m_1(y - q_1) + n_1(z - r_1) = 0 \quad (2.6)$$

该平面到原点的距离 d_3 为:

$$d_3 = |l_1 p_1 + m_1 q_1 + n_1 r_1| \quad (2.7)$$

点 P_0 到该平面的距离 d_4 为:

$$d_4 = |l_1(p_0 - p_1) + m_1(q_0 - q_1) + n_1(r_0 - r_1)| \quad (2.8)$$

垂足坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= p_0 + l[l(p_1 - p_0) + m(q_1 - q_0) + n(r_1 - r_0)] \\ y &= q_0 + m[l(p_1 - p_0) + m(q_1 - q_0) + n(r_1 - r_0)] \\ z &= r_0 + n[l(p_1 - p_0) + m(q_1 - q_0) + n(r_1 - r_0)] \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

当用多边形表示机器人的构件、环境物体的边界面时,有时需要判断从外部的点1向包含该多边形的平面(称为基平面)所作垂线的垂足是否落在多边形上。当物体为凸多面体时,设目标多边形的相邻多边形的基平面方向向量均朝向物体外部,且这些平面分别用

$$l_i x + m_i y + n_i z - d_i = 0 \quad (2.10)$$

来表示,如果对于所有的基平面,把垂足坐标 (x_f, y_f, z_f) 带入左边时得到负值,那么表示垂足在多边形的内部,否则在多边形的外部。当物体为非凸多面体时,以垂足为始点,在目标多边形的台平面内向任意方向作射线,若该射线与目标多边形的边的交点个数为奇数,则垂足在多边形内部,反之在多边形外部。

下面求两平面的交线。在式(2.10)中,当 i 分别取 1, 2 时,所得两个平面存在如下关系:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.11)$$

这表明,除了二者平行和重合,其他情况下一定相交,且交线为一直线。由于该交线的方向向量应垂直于两个平面的法线向量,故可由两个法线向量的外积给出,即

$$(m_1 n_2 - m_2 n_1, n_1 l_2 - n_2 l_1, l_1 m_2 - l_2 m_1) \quad (2.12)$$

设交线的方向向量为 (l_3, m_3, n_3) , 且通过点 (p_3, q_3, r_3) , 则可用下式表示:

$$\frac{x-p_3}{l_3} = \frac{y-q_3}{m_3} = \frac{z-r_3}{n_3} \quad (2.13)$$

(p_3, q_3, r_3) 可以是任意的。若设 $r_3 = 0$, 则有

$$p_3 = \frac{m_2 d_1 - m_1 d_2}{l_1 m_2 - m_1 l_2}, \quad q_3 = \frac{-l_1 d_2 + l_2 d_1}{l_1 m_2 - m_1 l_2} \quad (2.14)$$

通过原点的平面是平面的一个线性子空间。设有平面 $l_1 x + m_1 y + n_1 z = 0$, 与法线向

量 (l_1, m_1, n_1) 垂直相交的任意向量为 $v_2 = (l_2, m_2, n_2)$, 与 $(l_1, m_1, n_1), (l_2, m_2, n_2)$ 垂直相交的向量为 $v_3 = (l_3, m_3, n_3)$, 则对于任意数值 k_2, k_3 ,

$$k_2 v_2 + k_3 v_3 \quad (2.15)$$

是 $l_1 x + m_1 y + n_1 z = 0$ 上的点。

不通过原点的平面构成了仿射(affine)子空间。设 $P_1 = (p_1, q_1, r_1), P_2 = (p_2, q_2, r_2)$ 是平面 $l_1 x + m_1 y + n_1 z - d_1 = 0$ 上的任意两点, λ 和 μ 为满足 $\lambda + \mu = 1$ 的任意数值, 因为

$$\begin{aligned} l_1 (\lambda p_1 + \mu p_2) + m_1 (\lambda q_1 + \mu q_2) + n_1 (\lambda r_1 \\ + \mu r_2) - d_1 &= \lambda (l_1 p_1 + m_1 q_1 + n_1 r_1) \\ &+ \mu (l_1 p_2 + m_1 q_2 + n_1 r_2) - d_1 \\ &= (\lambda + \mu) d_1 - d_1 = 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

由定义可知, 此即仿射子空间。线性子空间为仿射子空间的一种。

3. 曲面

机器人零件的各个面都是平面或曲面的一部分。一般情况下, 有时人们用 Bezier 或 B-Spline 等高次曲面来逼近实际曲面, 但在机器人中则仅应用二次曲面。其原因有两个。首先, 当采用高次曲面时, 物体间的干涉检查和距离计算将变得过于复杂, 以至于很多情况下难以求解。其次, 在实际工作中, 很多情况下采用二次曲面就足够了。二次曲面中, 只需要球面和圆柱面就可以满足要求了。

以点 $P = (p, q, r)$ 为圆心, 半径为 s 的球面由下式给出:

$$(x-p)^2 + (y-q)^2 + (z-r)^2 = s^2$$

以过点 P 且与 z 轴平行的直线为轴, 半径为 s 的圆柱面为

$$(x-p)^2 + (y-q)^2 = s^2$$

以过点 P 且与方向向量 (l, m, n) 平行的直线为轴, 半径为 s 的圆柱面为

$$\begin{aligned} (1-l^2)(x-p)^2 + (1-m^2)(y-q)^2 \\ + (1-n^2)(z-r)^2 - 2[mn(y-q) \\ \times (z-r) + nl(z-r)(x-p) \\ + lm(x-p)(y-q)] = s^2 \end{aligned}$$

上述二次曲面之间的交线可以用解析式求解表达, 但一般均通过数值计算来求解。

2.5.2 几何算法

1. 凸多面体与凸多面体的干涉检查

检查凸多面体之间是否发生干涉的算

法, 至今一直处于研究之中。Dobkin 等提出了一种高速算法^[3], 即当凸多面体顶点数之和为 n 时, 其干涉检查所需的渐进计算量为 $O(\log^2 n)$ 。不过这种算法至今尚无实际应用过。Megiddo 提出了用 $O(n)$ 算法求解线性规划问题^[4], 使得凸多面体之间的干涉检查可以归纳为线性规划问题来求解。但此算法当 n 较小时, 计算很慢, 难以实际应用。

Gilbert 等提出了一种既能判断凸多面体之间是否发生干涉又能求出最短距离的方法^[5]。该方法应用了两个凸多面体的 Minkowski 差和最优解法, 因而被称为 GJK 法, 并成为一种标准方法。此后, 凡是提出新的求解凸多面体间最短距离的算法时, 首先要列出其优于 GJK 法之处。由于 GJK 法的速度非常快, 所以在单纯进行凸多面体间的干涉检查方面也成为一种标准方法。

动力学仿真时, 即使相同的物体形状也要多次反复地进行干涉检查。很多情况下, 前次检查的物体位置姿态与本次检查的物体位置姿态之间仅有微小的差别。利用该性质, Lin 等提出了一种求最短距离的高速算法^[6]。

2. 非凸多面体与非凸多面体的干涉检查

如果干涉检查的对象为一般多面体, 那么理论渐进计算量不可能小于 $O(n^2)$ 。为此, 人们进行了各种各样的尝试, 期望通过顺序检查干涉必要条件降低平均计算量。在 Gottschalk 等提出的方法中, 采用称为 Oriented Bounding Box 的六面体树将各个多面体均包括在内, 然后针对树的上位结点之间的干涉检查达到提高干涉检查效率的目的。

Oriented Bounding Box 针对多面体顶点的集合, 从特征向量计算和确定主轴, 然后进行求解。该方法尽管需要做预处理, 但对于包含数百万个多边形的集合为边界面的多面体, 在很短的时间内即可完成干涉检查。此外, Barequet 等^[7]和 Klosowski 等^[8]也提出了同样的方法。

3. 具有曲面边界的物体之间的干涉检查

前文提到, 二次曲面之间的交线可以通过解析的方法求出, 但是高次曲面的交线必须依靠数值计算。机械设计 CAD 中使用了求 B-Spline 面之间交线的方法, 而高速检查

分块曲面之间干涉的方法目前尚没有确定的结果。

2.6 拓扑几何

多关节机器人的状态可以利用关节角构成的向量来表示。对于两个关节角的轨迹,一般都是当作平面曲线来处理。此外,还可以用 3×3 的旋转矩阵或四元数来描述三维物体的姿态。但是,在表示这些状态的空间与欧氏空间在空间的“连接方法”,以及数学语言所表述的“拓扑”是不同的。例如,一个能够旋转 360° 的关节转动一周后,机器人返回原来的状态。但这个动作在数轴上表示时,对应的某个点处应该观察到跳变。

为了理解表示机器人状态的空间拓扑问题,并在数学上加以准确的描述,需要具备拓扑几何的基本知识。由于拓扑几何是机器人学中各种空间、变换的数学基础,因此本节在下面对拓扑几何作一些介绍。

2.6.1 流形

考虑图 2.9 所示的机器人,它由一个旋转关节和一个移动关节构成,自由度为 2。假设旋转关节能够自由转动 360° ,移动关节的长度变化范围为 $L_1 \sim L_2$ 。

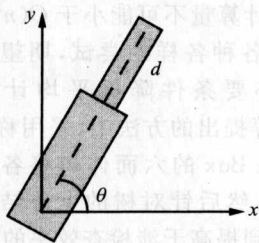


图 2.9 两关节机器人

应该怎样恰当地描述该机器人的关节空间呢? 首先将旋转关节变量 θ 作为横坐标,移动关节变量 d 作为纵坐标,并用此正交坐标系来表示机器人的姿态。对应于 θ 从 0 变化到 π , d 从 L_1 变化到 L_2 ,在坐标系中它的轨迹形状如图 2.10 所示。这只是初步的认识。

下面,如果让 θ 从 0 变化到 3π , d 从 L_1 变化到 L_2 ,又会出现什么现象呢? 图 2.11(a)和(b)表示的是相同的运动,但机器人的轨迹却不同,这表明图 2.9 中的两关节机器人的关节空间是难以在二维欧氏空间中表示的。

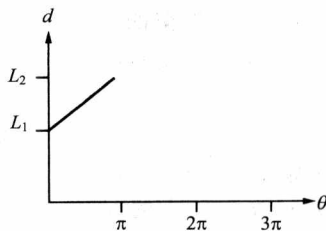
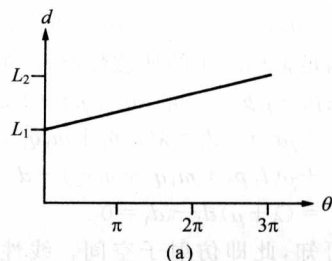
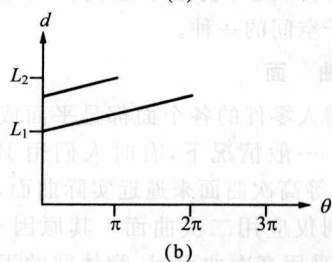


图 2.10 机器人轨迹示例



(a)



(b)

图 2.11 机器人轨迹示例

那么,到底应该怎样描述呢? 结论是:在正交坐标系中只有关节空间的开子集可以表示,而不能表示出集合全体。用数学语言表述为:关节空间为一**流形**,其开子集与欧氏空间是同胚的,而集合全体不与欧氏空间同胚。为了理解该结论,需要知道流形到底是什么。

流形是一个描述光滑曲线/闭曲面的广义概念。其数学定义如下^[1]:

定义 1 满足如下 4 个条件的空间 M 为一个 m 维 C^r 流形。

- ① M 是拓扑空间。
- ② M 是豪斯道夫空间(hausdorff space)。
- ③ M 是仿紧的(paracompact)。
- ④ M 的两个开子集的交集非空。若给定各个开子集向 m 维欧氏空间的同胚映射,则存在从一个欧氏空间开子集向另一个开子集的 C^r 映射。

读到这里,可能会有读者感到厌烦。不过由于不必全部理解上述内容,所以还请稍微忍耐一下。

在①中所涉及的拓扑空间的定义稍微有

些繁琐,它可以如下给出。

定义2 若空间 X 的子集族 F 满足如下公理,子集族 F 称为空间 X 的拓扑, X 称为拓扑空间^[2]:

- ① 集合 X 为开集。
- ② 空集为开集。
- ③ 对于 X 中的任意点 x ,至少有一个开集包含 x 。
- ④ 任意个开集的和集合仍然是开集。
- ⑤ 有限个开集的积集合仍然是开集。

下面以球面为例加以说明。球面上任意点 x 的邻域与球面的交集,就是球面的一个开子集。任意个这种开子集的和集合仍然是球面上的开集,故球面就是一个拓扑空间。

流形定义中的②和③并不具有本质意义,故不必太在意。关键的是④。这里略做说明^[1]。设 $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ 是空间 M 的开集的族(集合的集合),包含了 M 全体。给定了所有 U_λ 向欧氏空间 R^m 的同胚映射(连续且一一对应的映射,逆映射也是连续的),且交集不为空。则对于 $U_\lambda \cap U_\mu \neq \emptyset$ 的两个开集,开集 $\phi_\lambda(U_\lambda \cap U_\mu)$ 向开集 $\phi_\mu(U_\lambda \cap U_\mu)$ 的映射

$$\Phi = \phi_\mu \circ \phi_\lambda^{-1}$$

存在可 r 次微分的连续映射 C^r 。这比④的记述更加准确,但至于为什么会这样尚不清楚。

再举球面的例子。整个球面可以用有限个开子集覆盖。具体到地球来说,用以日本、欧洲、南美为中心的三个足够大的地域即可覆盖整个地球。如果不包括边界线,则这些地域就对应于上述的 U_λ 。

当各个地域用平面地图来表示时,原为地球一部分的区域就成为一个平面。这个映射相当于上述的 ϕ_λ 。设以日本为中心的区域和以欧洲为中心的区域都包含美国。由于两个地图中美国的位置不同,美国的形状也不相同。但各个州之间的相邻关系却不会改变。只要稍微变形,就可以使两者相同。这种对应关系由上述连续映射 Φ 给出。这里的相邻关系即为拓扑。至此读者是否理解了流形的实质了呢?

现在再返回到两关节机器人的例子中来。旋转关节转动 2π 后返回到原来的位置。这与圆是同胚的。如果圆为 S^1 ,球面为 S^2 ,则二者分别为一维和二维流形。而移动关节与直线 R 为子集同胚。机器人的姿态通过旋转

关节角和移动关节位置的组合而确定,用 $S^1 \times R$ 表示。“ \times ”称为叉乘积。于是,机器人的姿态为叉乘积 $S^1 \times R$ 表示的流形,且与圆柱面同胚。而流形 $S^1 \times R$ 与二维欧氏空间 R^2 不同胚。用数学语言表述,则可说拓扑不同。此即图 2.11 中所发生的现象的原因。

那么,如何才能恰当地描述机器人的关节空间呢? 关节空间的全体是无法在二维平面中表示的,但如果是其中的一部分则是可能的。图 2.12 即为一个例子。

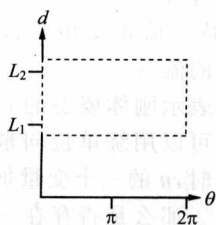


图 2.12 chart 的例子

图 2.12 中虚线所围成的区域是二维的,且可以在欧氏空间中参数化,但不包括虚线所示的边界。由于包含边界的集合不是开集,因而无法定义由流形向欧氏空间的 C 映射。故即使 d 的区间小于 L_1 大于 L_2 ,也不能包含边界。这种由流形的开集向欧氏空间的同胚映射称为局部坐标系或图(chart)。

覆盖流形 $S^1 \times R$ 至少需要两个局部坐标系。如图 2.12 和图 2.13 所示,两个映射到开区域中的流形开子集即可覆盖全体。

覆盖流形全体的图的集合称为图集(atlas)。如果图(chart)是世界各地的地图,那么图集就是世界地图。

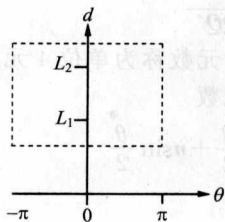


图 2.13 chart 的例子

2.6.2 机器人的构形空间

由空间中的一点可以唯一确定机器人姿态的空间称为机器人的构形空间 C 或位形空间。该词由 configuration space 翻译过来。在

下面的研究中,采用“构形空间”的说法。构形空间中的各点称为构形 q 。

构形空间是一个流形。如移动机器人在平面内作直线和旋转运动的构形空间可以用 $R^2 \times S^1$ 来表示。其中,直线运动对应于 R^2 , 旋转运动对应于 S^1 。由于 S^1 与 2×2 的实特征值正交矩阵群 $SO(2)$ 同胚(SO 即 Special Orthogonal group), 故移动机器人的构形空间可写作 $R^2 \times SO(2)$ 。反之, S^1 也可称为 $SO(2)$ 向 R^2 的嵌入。据此,三维空间中运动刚体的构形空间可以写成 $R^3 \times SO(3)$ 。其中, $SO(3)$ 为 3×3 的实特征值正交矩阵群。下面考虑与 $SO(3)$ 同胚的流形。

首先介绍表示刚体姿态的其他方法。刚体的任意旋转可以用绕单位向量 n 旋转 θ 角度来表示。这时, n 的三个变量加上角度 θ 一共是四个变量。那么是否存在一种用这四个变量描述旋转的方法呢。为此,考察下面的四维代数,代数的元素可以写作

$$Q = q_0 + q$$

式中, q_0 为标量; q 为三维向量; Q 由 4 个变量组成。这里的“+”只是为了书写上方便而采用的符号,不具有加法的含义。两个元素 P 和 Q 的积定义为

$$r_0 = p_0 q_0 - p \cdot q$$

$$r = p_0 q + q_0 p + p \times q$$

这里,向量的内积和外积遵循通常的定义。这种定义成积的四维向量称为 4 元数。若 Q 的共轭 Q^* 定义为

$$Q^* = q_0 - q$$

则由定义知, QQ^* 为标量。 Q 的长度 $|Q|$ 定义为

$$|Q| = \sqrt{QQ^*}$$

长度为 1 的 4 元数称为单位 4 元数。考虑如下的单位 4 元数

$$Q = \cos \frac{\theta}{2} + n \sin \frac{\theta}{2}$$

由

$$v' = QvQ^*$$

可得向量 v 绕单位向量 n 旋转角度 θ 后的向量 v' 。由前面定义的积运算,该 4 元数构成了一个群。这是因为

① 两个单位 4 元数 P, Q 的积 PQ 的长度为 1, 因而是单位 4 元数。

② 结合律 $PQ \times R = P \times QR$ 成立。这很容易根据积的定义证明。

易根据积的定义证明。

③ 当 $\theta = 0$ 时, $E = 1 + 0, EQ = Q$, 所以 E 为单位元。

④ 由定义可知, Q 的共轭 Q^* 是 Q 的逆元。

群的定义中最重要的就是上述①。这是因为两元素的积仍属于原集合这一点非常重要。 Q 的群称为 $SU(2)$ (SU 即 Special Unitary)。

作为群, $SU(2)$ 与 $SU(3)$ 是弱(准)同胚的。当两个群为弱(准)同胚时,在一个群中的计算与在另一个群中的计算结果一致。换言之,三维空间中的旋转无论是用 $SO(3)$ 还是用单位 4 元数的群来计算,所得结果相同。之所以前面加个“弱(准)”,是由于两个群之间不具有——对应的关系。由于旋转变换具有 $v' = QvQ^*$ 的形式,故 $SO(3)$ 中的一个元素对应于 Q 和 $-Q$ 两个元素。

$SU(2)$ 与三维单位球面 S^3 流形是同胚的。因为 $Q \in R^4, QQ^* = 1$, 因此单位 4 元数的集合为四维欧氏空间的三维单位球面。遗憾的是, S^3 与目标 $SO(3)$ 不是同胚的流形。原因就在于其对应关系为 2 对 1。为了找到与 $SO(3)$ 同胚的流形,还需另想办法。

为此,考察投影空间的概念。所谓投影空间,就是将通过 n 维欧氏空间 R^{n+1} 原点的直线上的所有点看作是同一数值,并作为一个点来考虑的空间。对于 R^{n+1} 中的点 X , 可以将过其邻域内的点和原点的直线看作过点 X 和原点的直线的邻域,故投影空间为拓扑空间,记为 P^n (P 即 Projective)。

对于 S^3 的全部元素,因为 Q 和 $-Q$ 位于过 R^4 原点的同一条直线上,所以可看作同一数值。该等价关系记为 $Q \sim -Q$ 。由小空间 S^3/\sim 可知, S^3/\sim 中的 1 点到过 R^4 原点的直线的同胚映射存在,因而 S^3/\sim 与 P^3 同胚。通过以上分析,最终得到了与 $SO(3)$ 同胚的流形,即三维投影空间 P^3 。

通过上述分析可知,在二维平面内进行移动和旋转运动的机器人的构形空间为流形 $R^2 \times S^1$, 在三维空间内进行移动和旋转运动的机器人的构形空间为流形 $R^3 \times P^3$ 。至此,我们应该了解到机器人构形空间旋转部分的拓扑和欧氏空间是完全不同的。如前所述,整个流形是无法在一个正交坐标系中描述

的,局部坐标系只能定义在其开子集上。掌握这一点对于确定描述机器人位置姿态的坐标系非常重要。

2.6.3 机器人的路径、速度、距离

由 2.6.2 节的研究已经知道了机器人的构形空间是流形。这里对其路径、速度和距离等加以研究。

机器人的路径为构形空间中从点 q_0 到 q_1 的连续曲线,可用映射 p 定义如下:

$$p: [0, 1] \rightarrow C$$

$$p(0) = q_0, p(1) = q_1$$

下面来考虑图 2.9 中的两关节机器人构形空间 $R \times S^1$ 上的路径。 $R \times S^1$ 为嵌入在 R^3 中的无限长圆柱面。在此基础上,考虑图 2.14 所示的三个路径。

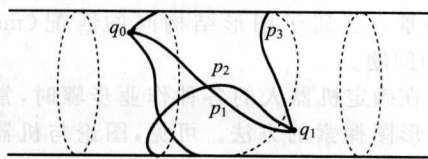


图 2.14 非同伦路径的例子

p_1 为无旋转地从初期构形 q_0 到 q_1 的路径; p_2 为旋转一次后由 q_0 到 q_1 的路径;而 p_3 则为沿着相反方向,旋转一次后从 q_0 到 q_1 的路径。这种情况下,尽管始点 q_0 和终点 q_1 相同,但无论 p_1 、 p_2 、 p_3 怎样连续变化,它们相互之间也不可能重合,即不能同形。这里所谓的通过连续变化而相互重合,是指存在着使下述条件成立的连续映射 $F: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow Y$ 。

$$\forall x \in [0, 1]; F(x, 0) = p_1(x),$$

$$F(x, 1) = p_2(x)$$

这时的 p_1 、 p_2 称为关于闭区间 $[0, 1]$ 的同伦 (homotopic)。但对于图 2.14 中的 p_1 、 p_2 、 p_3 来说,这样的连续映射不存在。其原因在于这些路径不能穿透圆柱面。在流形中,可以形象地比喻为开一个“孔”,此时尽管始点和终点一样,但可穿行的“通路”却有多条。这样的空间称为多重连结空间。在欧氏空间中,连结始点和终点的所有路径是同伦的。“通路”只有一条。这种空间称为单连结空间。

由于同伦关系是等价关系,所以路径的集合可分为相互间互为同伦者的等价类,称为同伦类。等价类的数量,在上例中等于整

数。这是因为从始点到终点的过程中,既有旋转一次、旋转两次,也有反向旋转一次、反向旋转两次等路径。

实现旋转运动的机器人,其构形空间为多重连结空间。这一点对有关概念的理解和机器人动作规划具有重要意义。如在规划从始点到终点的路径时,躲避障碍物的解路径可能只存在于某个同伦类中,而其他的同伦类中则不存在。因此,如果在进行单向的路径搜索(无返回的路径)时陷于无解的同伦类中,将无法找到解。这就像因迷路而走进了死胡同,如果只能单向前进,将永远无法到达出口。

如果存在障碍物,人们很容易地就可以想像出空间开着孔,空间是多重连结的。但如果不存在障碍物,随着机器人旋转,在机器人构形空间内也开了孔,成为多重连结空间。这一点较难理解,需多加注意。

下面研究机器人的速度或者说动作的方向。首先定义流形的切向量。设 M 维流形 C 上的路径 $p(s): s \in [0, 1] \rightarrow C$ 的局部坐标可表示为

$$(x_1(p(s)), x_2(p(s)), \dots, x_m(p(s)))$$

这时,

$$\tau(p(s_0)) = \left(\frac{dx_1(p(s))}{ds}, \frac{dx_2(p(s))}{ds}, \dots, \frac{dx_m(p(s))}{ds} \right)_{s=s_0}$$

m 个数字的组合 $\tau(p(s_0))$ 取相同值路径的等价类称为 $p(s_0)$ 中的流形 C 的切向量。数学上对此有更加一般性的定义,但由于这里的目的只是为了理解,故采用了这种定义。这里的 $\tau((s_0))$ 为 $s=s_0$ 处路径 $p(s)$ 的“朝向”,或者说动作的方向。由定义知

$$(\lambda \tau)(p(s_0)) = \lambda(\tau(p_0))$$

$(\tau_1 + \tau_2)(p(s_0)) = \tau_1(p(s_0)) + \tau_2(p(s_0))$ 成立。这里的 τ_1 和 τ_2 为在两个局部坐标系中表示的切向量。基于上述关系,流形 C 上点 $p(s_0)$ 处的所有切向量的集合构成线性空间(证明过程略),其维数等于流形的维数 m 。若变量 s 采用时间,切向量就成为速度向量。

切空间是在流形的各点处一个一个加以定义的。切向量本身没有意义,它必须与流形上的点一起才能表示动作的方向。例如,当刚体的姿态用 4 元数表示时,仅仅用对 s 的微分不能确定姿态的变化,还必须用到 4 元

数的数值。这与刚体的角速度是完全不同的,对此也应予以注意。

在多关节机器人的运动学解析中,存在着这样的姿态,即在该姿态下机器人手部或者无法向某方向运动,或者为了朝某个方向运动,关节必须大幅度调整。前者称为奇异姿态,后者可称为“易动性”,它是机器人可操作度的评价标准。奇异姿态对应于流形的奇异点,即机器人流形(构形空间)的某点处,维数小于关节数的点。可操作度则可作为评价流形中某点邻域局部形状的指标。不过,如果对于前面流形的概念不甚理解,那么这些概念的理解也将比较困难。因此希望大家在看完相关内容后,再温习一遍本节的内容。

最后来研究流形上的距离。流形的拓朴与欧氏空间是不同的,因此需要注意距离的定义。例如,对于图 2.9 中的两关节机器人,我们来考虑如下的问题,即两个局部坐标值 (θ_1, d_1) 、 (θ_2, d_2) 定义的量

$$\rho_2 = \sqrt{(\theta_1, \theta_2)^2 + (d_1, d_2)^2}$$

那么 ρ_2 是否可以作为距离的定义呢? 实际上, ρ_2 不能作为距离的定义,原因有两个:第一, θ 的单位为弧度,而 d 的单位为米。不同单位的两个量的平方和没有意义;第二,也是更加重要的一点,由于旋转关节与 S^1 同胚,两个点在同一个局部坐标系的差平方即使很大,在流形上也不一定相距很远,因为两者在其他的局部坐标系中的差平方可能很小。简单来说,即使是在圆周上相邻的两点,当沿相反方向绕一周时,其距离也很大。

流形上距离的定义方法之一,就是引入流形上各点的切向量的内积,并对其沿路径进行积分求得路径的“长度”。路径“长度”的下限值定义为距离。即当 $dp(s)/ds = \tau(p(s))$ 时,有

$$L(s) = \int_0^1 \left\| \frac{dp(s)}{ds} \right\| ds$$

则对于所有路径 p ,求 $L(p)$ 的下限,并将其作为距离,其中, $\|\tau\|$ 为由切向量间的内积所定义的切向量的范数。

若机器人为 $R^3 \times P^3$ 的构形空间,在机器人上取不在同一直线上的 3 个点 $a_1(X, Q)$ 、 $a_2(X, Q)$ 、 $a_3(X, Q)$ (X 为移动位置, Q 为 4 元数),则距离可定义为

$$\sum_{i=1}^3 \|a_i(X_1, Q_1) - a_i(X_2, Q_2)\|$$

这里的范数为欧氏范数。此即刚体上 3 点间距离之和。由此定义,就可以远远地避开单位系问题。

关于距离的定义还有其他很多种,详细内容可以参见文献[8]。

比留川博久

2.7 图 论

图论应用在机器人技术的许多方面。例如,移动机器人作业的路径规划其实就是图论。在路径探索时,大多是用图来描述周围环境,而从图中找出满足要求的路径也需要应用图论中的探索方法。

机器人视觉图像处理,通过实际图像的线图与环境模型线图的对比就可识别出物体或场景。这属于图形结构间的匹配(matching)问题。

在确定机器人的各种作业步骤时,常采用树形图探索的方法。可见,图论与机器人技术有着密切的关系。

本节将从实用的角度出发,对有关概念作深入浅出的讲解。

2.7.1 图及其描述

图是描述给定的点和线之间连接关系的符号,可分为无向图和有向图。无向图常简称为图。

1. 图(无向图)

图(graph)是 $G=(V, E)$ 由节点(vertex)集合 $V=V(G)$ 和边(edge)集合 $E=E(G)$ 所构成的。有时也将节点称为顶点(node),边称为分支(branch)。当两点 x, y 用边 e 连接起来时,称 x, y 为 e 的端点(end vertex), x 和 y 邻接(adjacent), x 与 e 或 y 与 e 为关联(incident)。当边的两个端点重合时称为环(loop)。当连接两点 x, y 的边有两条以上时,称这些边为重边(multiple edges)。

图 $G(V, E)$ 中节点的个数 $|V|$ 称为 G 的阶(order),边的数量 $|E|$ 称为 G 的边数(size)。与图 G 中的点 v 关联的边的数量称为 v 的度数(degree),记为 $d(v)$ 。关于图 $G(V, E)$,有下式成立:

$$\sum_{x \in V} d(x) = 2|E|$$

由此式可知,图中含有偶数个奇数次数的点。

图 G 中,相互关联的节点和边交替排成的列 $P: v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \cdots e_l v_l$ (e_i 为连接 v_{i-1} 和 v_i 的边),称为从节点 v_0 到 v_l 的长为 l 的链(walk)。当 $l > 0$, 且 $v_0 = v_l$ 时,称链 P 为闭链。边互不相同的链称为迹(trail),闭合的迹称为回(circuit)。除端点 v_0 和 v_l 外,所有节点均不相同的迹称为路(path),封闭的路称为环(cycle)。如果路中的各个边仅出现一次,各个节点也仅通过一次,称该路是简单的(simple)(两个端点可以重合)。如果环刚好依次通过图中所有的边,称为欧拉环(Eulercircuit)。如果迹通过图中所有的边且仅通过一次,那么称为欧拉迹(Euler trail)。欧拉环和欧拉迹俗称一笔画。

如前所述,路(path)的每个边和每个节点均只出现一次时称其为简单的(simple)(两个端点也可以重合)。由简单路所构成的环称为简单环。通过图中所有节点的简单环称为哈密顿环(Hamilton circuit)。

图 G 中欧拉环存在的充要条件为 G 中各节点的度数均为偶数。非封闭的欧拉迹存在的充要条件为 G 中两个节点的度数为奇数,而其余节点的度数为偶数。上述条件对于哈密顿环是否成立尚不得而知。

例如,图 2.15 中所示的 $v_1, e_1, v_2, e_2, v_3, e_8, v_6, e_9, v_5, e_7, v_3$ 为开链(walk), $v_1, e_1, v_2, e_3, v_5, e_7, v_3, e_2, v_2, e_1, v_1$ 为闭链。 $v_1, e_1, v_2, e_2, v_3, e_8, v_6, e_9, v_5, e_7, v_3$ 为开迹, $v_1, e_1, v_2, e_2, v_3, e_7, v_5, e_3, v_2, e_4, v_4, e_5, v_1$ 为闭迹。 v_1, e_1, v_2, e_2, v_3 为路, $v_1, e_1, v_2, e_3, v_5, e_6, v_4, e_5, v_1$ 为回。

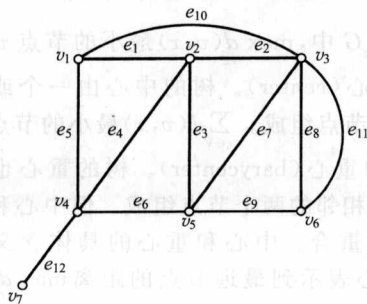


图 2.15 图 例

连接图 G 中两节点 x, y 的路(path)的最小长度称为 x, y 之间的距离(distance),记为 $d(x, y)$ 。如果连接 x, y 的路(path)不存在,

那么定义 $d(x, y) = \infty$ 。 G 中两节点间距离的最大值定义为图 G 的直径(diameter)。若图 G 的直径为有限值,即图中任意两节点间的路都存在,则称 G 连通(connected)。非连通的图可以划分成几个连通的部分,称为连通分支(connected component),或简称为分支。

2. 有向图

有向图(directed graph, digraph) $D = (V, A)$ 是由节点集合 $V = V(D)$ 和弧(arc)集合 $A = A(D)$ 所构成的。其中的节点称为顶点,弧称为有向边或边。从节点 x 到节点 y 的弧用 (x, y) 、 xy 或 \vec{xy} 等表示。

从节点 x 到节点 y 的弧 a 中, x 称为 a 的始点(initial vertex), y 称为 a 的终点(terminal vertex),同时,称 a 从 x 连接和 a 连接到 y 。始点和终点重合的弧称为环(loop)。当 x 到 y 的弧有两条以上时,称为平行弧或多重弧。有向图 $D = (V, A)$ 中, $|V|$ 称为 D 的阶, $|A|$ 称为 D 的边数(size)。

有向图 D 中,节点与弧交替所排成的列 $P: v_0 a_1 v_1 a_2 v_2 \cdots a_l v_l$ (弧 a_i 从 v_{i-1} 到 v_i) 称为从节点 v_0 到节点 v_l 且长度为 l 的有向链。同样,可以定义有向迹、有向路、有向回、有向环等。

3. 图的矩阵表示

用点和线构成的图是一种易于理解的直观表示方法。不过一旦图中的一些量需要用计算机计算时,图就无能为力了。这时的有效方法是借助图的矩阵表示法。

阶(order)为 n 的图 G 可以用如下的 $n \times n$ 矩阵 $A = A(G)$ 表示。首先,定义 $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 和 $[A]_{ij} = C$ (连接 v_i 和 v_j 的边的数量)。

这里的矩阵 A 称为图 G 的邻接矩阵(adjacency matrix)。如果 G 是一个没有环和重边的简单图,则有

$$[A]_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 邻接} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

阶(order)为 n 的有向图 D 的邻接矩阵 $A = A(D)$ 可定义为 $V(D) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 和 $[A]_{ij} = C$ (从 v_i 到 v_j 的弧的数量)。

例如,图 2.16 中的图和有向图的邻接矩阵分别如下式,而 $V = \{a, b, c, d\}$ 。

$$\text{图 } G: \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{有向图 } D: \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

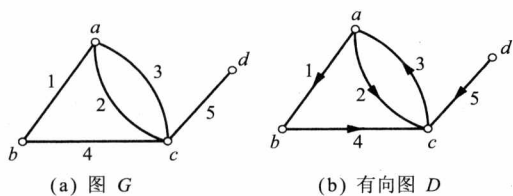


图 2.16 图和有向图的例子

阶为 n , 边数为 m 的图 G 还可用如下的 $n \times m$ 矩阵 $B = B(G)$ 来表示。定义为 $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$, 以及

$$[B]_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i \text{ 与 } e_j \text{ 关联} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

该矩阵称为关联矩阵 (incidence matrix)。如果有向图 D 的阶为 n , 边数为 m , 由于 $V(D) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $A(G) = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$, 以及

$$[B]_{ij} = \begin{cases} 1, & a_i \text{ 的始点为 } v_i \\ -1, & a_i \text{ 的终点为 } v_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

故定义关联矩阵为 $B = B(D)$ 。图 2.16 的图 G 中, $V(D) = \{a, b, c, d\}$, $E(G) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 以及

$$B(G) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$B(G)$ 的各列中刚好出现了两次 1, 且 i 行元素的和等于 v_i 的度数。图 2.16 中的有向图 D 中, $V(D) = \{a, b, c, d\}$, $A(D) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 且

$$B(D) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在 $B(D)$ 的各列中, 1 和 -1 各出现一次, 且 i 行中 1 的个数等于从 v_i 出现的次数, -1 的数量等于 v_i 的次数。

当在简单图的各个边 e 上乘以实数值的权重 $w(e)$ 后, 称为权图 (weighted graph), 可用如下的矩阵 A 表示。设 $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则有

$$(A)_{ij} = \begin{cases} w(v_i v_j), & \text{存在边 } v_i v_j \\ \infty, & \text{其他} \end{cases}$$

如果图的规模不很大, 那么利用上述各种矩阵即可描述它, 且能够提供各种运算。

但是, 若图的规模很大, 就需要提高处理的效率。具体来说, 就是减小所需的计算机内存, 提高算法的速度。为满足上述要求, 出现了所谓的 list 构造表示法。图 2.17 即为图的邻接 List 描述。

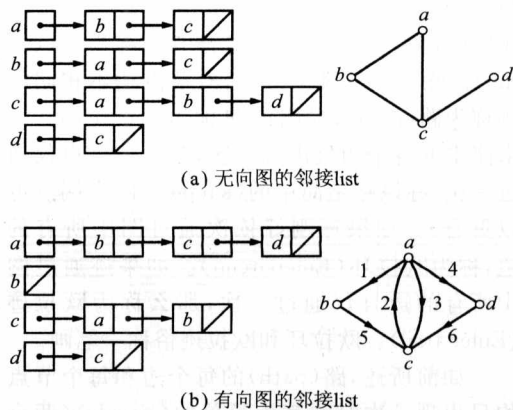


图 2.17 图的邻接表现

2.7.2 树, 有根树, 二叉树

彼此连通而不含环的图称为树 (tree)。图 2.18 中列出了所有的 5 阶树。度数 (degree) 为 1 的节点称为图的端点 (end vertex), 或叶 (leaf)。2 阶以上的树至少有两个端点。一般来说, 包含有阶数为 k 的节点的树中有 k 个端点。

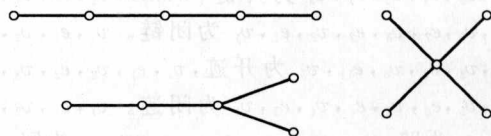


图 2.18 所有的 5 阶树

图 G 中, $\max_{x \in V} d(v, x)$ 最小的节点 v 称为 G 的中心 (center)。树的中心由一个或相邻的两个节点组成。 $\sum_{x \in V} d(v, x)$ 最小的节点 v 称为 G 的重心 (barycenter)。树的重心也是由一个或相邻的两个节点组成。但中心和重心不一定重合。中心和重心的具体含义分别为: 中心表示到最远节点的距离 $\max_{x \in V} d(v, x)$ 为最小的节点, 可用于分析应急设施的布置等问题。重心表示从各个节点 x 到某节点 v 的距离之和最小的节点, 即对于处于分散的若干节点向某个人所处的节点集合时, 搜寻全体移动成本最小的那个节点。

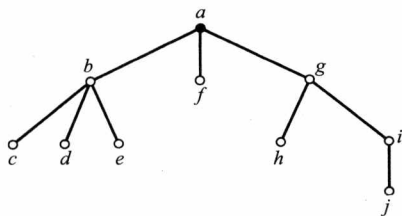


图 2.19 深度为 3 的有根树

如果指定树中的某节点为根(root),则称为有根树(rooted tree)。图 2.19 给出了常用的有根树。其中最上部的 a 为树的根,与 a 之间的距离为 1 时的节点称为层 1(level 1),依此类推,与 a 相距为 i 的节点称为层 i 。层的最大值称为树的深度(depth)或高度(height)。当层 i 的节点 x 和层 $i+1$ 的节点 y 为相邻节点时, y 称为 x 的子(son, child), x 称为 y 的父(father, parent)。如果 z 点位于连接根和节点 x 的路上,称 z 是 x 的祖先(ancestor), x 是 z 的子孙(descendant)。有根树的端点称为叶(leaf)。有根树中,若除了根和叶,其他所有节点的阶数都为 3,如果根的阶数为 2,称该有根树为二叉树(binary tree)。与此相同,还可以定义 3 叉树、4 叉树、8 叉树等。

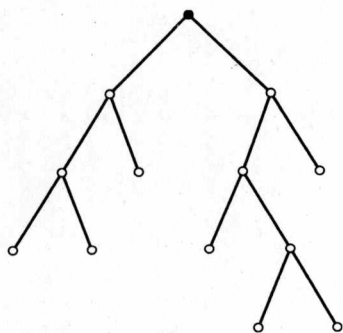


图 2.20 深度为 2 的二叉树

2.7.3 图与网络

如果将具有一定属性的物理量(如长度、容量、费用等)赋予图的各个边,称该图为网络(network)。通信网、道路网、铁路网、给水管网、电力网、计算机网等均为典型的网络。与网络有关的典型问题,包括:

(1) 最短路径问题 网络的某入口和出口之间最短距离的搜索问题(连接节点和节点之间的各个边均有距离时)。

(2) 最大流量问题 网络内的某入口和出口之间最大交通量(流量)路径的搜索问题(连接节点和节点的各个边均具有容量时)。

(3) 最小费用流问题 网络内的某入口和出口间交通费用最小的路径搜索问题(连接节点的各个边定义了单位流通容量的费用时)。

由于问题(1)与机器人技术有密切的关系,因此在此对其中著名的 Dijkstra 算法加以介绍。当图 $G(V, A)$ 中各个边 $a \in A$ 的长度为 $l(a)$ [$l(a) \geq 0$] 时,该算法用于搜索从点 $v_0 \in V$ 到其他所有点的最短路径。关于图的各种算法及其详细内容,参阅文献[1]~[5]。

Dijkstra 法

步骤 1 对于 $v \in V$ 的各点, $\text{dist}(v) \leftarrow +\infty$, $\text{pred}(v) \leftarrow \text{null}$, 对于始点 v_0 , $\text{dist}(v_0) \leftarrow 0$
 $v \leftarrow v_0$, $H \leftarrow \phi$

步骤 2 对于点 v 的分支 (v, w) , 如果 $\text{dist}(w) > \text{dist}(v) + l(v, w)$, 则
 $\text{dist}(w) \leftarrow \text{dist}(v) + l(v, w)$;
 $\text{pred}(w) \leftarrow v$;

若是 $w \notin H$, $H \leftarrow H \cup \{w\}$

步骤 3 如果 $H = \phi$, STOP。

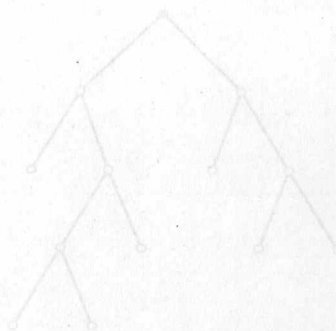
若 $H \neq \phi$, 则该点为 H 中的节点。这时, 用层 dist 的最小值代替 v , 返回 Step2。

柿仓正义

参考文献

- 2.1 矩阵理论; 2.2 向量空间
- [1] 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論, 計測自動制御学会 (1978)
 - [2] R. Bellman: Introduction to Matrix Analysis, McGraw-Hill (1970)
 - [3] 洲之内: 関数解析入門, サイエンス社 (1970)
 - [4] 小郷, 美多: システム制御理論入門, 実教出版 (1979)
- 2.3 向量分析; 2.4 座标变换与齐次变换
- [1] 安達: ベクトルとテンソル, 培風館 (1957)
 - [2] 安達: ベクトル・解析, 培風館 (1957)
 - [3] Richard P. Paul: Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, MIT Press (1981)
- 2.5 解析几何
- [1] 矢野健太郎: 図形と式—解析幾何入門, 講談社 (1979)
 - [2] 新数学事典: 大阪書籍 (1986)
 - [3] D. P. Dobkin and D. G. Kirkpatrick: Determining the separation of preprocessed polyhedra—A

- unified approach, In Proc. 17th Int. Colloq. Automata Lang. Program., 400/413 (1990)
- [4] N. Megiddo: Linear-time algorithm for linear programming in r^3 and related problems, SIAM J. Computing, vol.12, 759/776 (1983)
- [5] E. G. Gilbert, D. W. Johnson and S. S. Keerthi: A fast procedure for computing the distance between objects in three-dimensional space, IEEE J. Robotics and Automation, Vol.4, 193/202 (1988)
- [6] M. C. Lin and John F. Canny: Efficient algorithm for incremental distance computation, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1008/1014 (1991)
- [7] G. Barequet, B. Chazell, L. Guibas, J. Mitchell and A. Tal: Box tree: A hierarchical representation of surfaces in 3d, Proc. Eurographics (1996)
- [8] J. Klosowski, M. Held, J. S. M. Mitchell, H. Sowi-zral and K. Zikan: Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops, Siggraph Visual Proceedings, 151 (1996)
- ### 2.6 拓扑几何
- [1] 泉屋周一, 石川剛郎: 応用特異点論, 共立出版 (1998)
- [2] 野口宏: トポロジー基礎と方法, 日本評論社 (1971)
- [3] 丹野修吉: 多様体の微分幾何学, 実教出版 (1990)
- [4] 小林貞一: トポロジー, 近代科学社 (1987)
- [5] ゴールドスタイン: 古典力学, 吉岡書店
- [6] J. F. Canny: The Complexity of Robot Motion Planning, The MIT Press (1988)
- [7] J-C. Latombe: Robot Motion Planning, KAP (1991)
- [8] M. Spivak: A Comprehensive Introduction to Differential Geometry, Publish or Perish Inc. (1979)
- ### 2.7 图论
- [1] Alan Gibbons: Algorithmic Graph Theory, Cambridge Univ. Press (1985)
- [2] M. N. S. Swamy and K. Thulasiraman: Graphs, Networks, and Algorithms, Wiley Interscience Publication (1981)
- [3] Bernard Carré: Graphs and Networks, Oxford Univ. Press (1979)
- [4] R. Bellman, K. L. Cooke and J. Lockett: Algorithm, Graphs, and Computers, Academic Press (1970)
- [5] Masao Iri: Network Flow, Transportation and Scheduling Theory and Algorithms, Academic Press (1969)



第3章 力学基础

3.1 质点运动

当对几何学上的点赋予质量属性时,就称之为质点。质点是物体的力学抽象。如果物体的运动范围与其尺寸比较大很多的时候,可以近似地将全部质量集中于物体的任意一点(一般选重心),即把物体视为一个质点来处理。

3.1.1 位置、速度、加速度和轨道

质点的空间位置可用以任意坐标系原点 O 为始点的位置向量 \mathbf{r} 来表示,如图 3.1 所示。质点的位移等于始点和终点位置向量的差 $\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}'-\mathbf{r}$ 。当位置向量以时间函数 $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$ 的形式给出时,质点运动即被确定。

设 Δt 时间内质点的位移为 $\Delta\mathbf{r}$,质点沿空间曲线移动的弧长为 Δs ,则向量

$$\mathbf{v}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{r}}{ds} \frac{ds}{dt}$$

称为速度,标量 $v=ds/dt$ 表示运动的快慢。若 Δt 内速度的增量为 $\Delta\mathbf{v}$,向量

$$\mathbf{a}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \dot{\mathbf{v}} = \ddot{\mathbf{r}}$$

称为加速度。 Δt 时间内加速度的极限值称为二次加速度(或加加速度(jerk))。

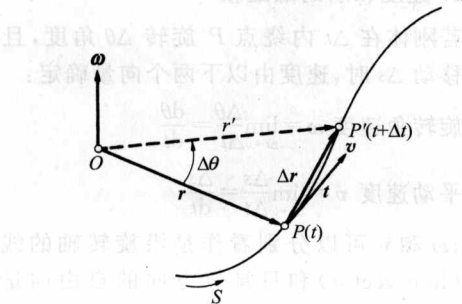


图 3.1 质点的位移和速度

加速度描述了速度大小和方向随时间变化的快慢程度,且由两项所构成。设 Δt 内质点绕定点 O 的角位移为 $\Delta\theta$,向量

$$\boldsymbol{\omega}=\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

度。它垂直于包含质点运动方向和固定点 O 的平面,描述了运动中质点位置称为角速度向量在空间所扫过的角度随时间变化的快慢程度。角速度为轴向量(axial vector)。但借助伴随向量,可以按照与速度一样的极向量(polar vector)来处理。

当质点位置随时间而变化时,质点在运动空间内的轨线称为路径(path)。作为时间函数的质点的位移和速度用图表示时称为轨迹(trajjectory)。如果所选择的坐标系恰当,那么位置向量 $\mathbf{r}(x,y,z)$ 的路径和轨迹可分别表示为 $f(x,y,z)=0$ 和 $f(x,y,z,t)=0$ 。当坐标轴的状态量为位移、速度或加速度等时,其平面称为相位平面。运动质点在相位平面上形成的图称为相位轨迹。

3.1.2 相对运动

观测者静止(静止坐标系 $O-XYZ$)和运动(运动坐标系 $O'-xyz$)时对同一运动质点的观测结果不同。两种观测结果之间具有如下关系。

1. 相对位置(图 3.2)

设点 P 的静止坐标和运动坐标分别为 (R_1, R_2, R_3) 和 (r_1, r_2, r_3) ,各坐标轴的单位向量分别为 \mathbf{E}_i 和 $\mathbf{e}_i (i=1,2,3)$,则点 P 在静止

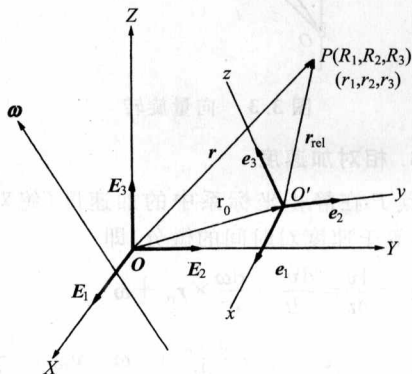


图 3.2 相对运动

坐标系中的位置向量 \mathbf{r} 为运动坐标系原点 O' 的位置向量 \mathbf{r}_0 与点 P 在运动坐标系中的位置向量 \mathbf{r}_{rel} 之和, 即

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \sum_i R_i \mathbf{E}_i = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_{\text{rel}} \\ &= \mathbf{r}_0 + \sum_i r_i \mathbf{e}_i\end{aligned}$$

2. 相对速度

点 P 在静止坐标系中的速度(绝对速度)为相应位置向量关于时间的微分, 即

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} + \frac{d\mathbf{r}_{\text{rel}}}{dt} \\ &= \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} + \sum_i r_i \frac{d\mathbf{e}_i}{dt} + \sum_i \frac{dr_i}{dt} \mathbf{e}_i\end{aligned}$$

当向量 \mathbf{r} 以角速度 $\boldsymbol{\omega}$ (旋转轴的单位向量) 为 \mathbf{e} , 图 3.3) 旋转时, 有

$$d\mathbf{r} = (\boldsymbol{\omega} dt) \times \mathbf{r}, \text{ 即 } \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$$

上式可表示为

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{\text{rel}} + \mathbf{v}_{\text{rel}}$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 为运动坐标系相对于静止坐标系的角速度向量。右边第 1 项与第 2 项的和称为牵连速度, 表示点 P 与运动坐标系固结在一起时的绝对速度, 第 3 项为点 P 相对于运动坐标系的相对速度, 记为

$$\mathbf{v}_{\text{rel}} = \sum_i \frac{dr_i}{dt} \mathbf{e}_i = \frac{d^* \mathbf{r}_{\text{rel}}}{dt}$$

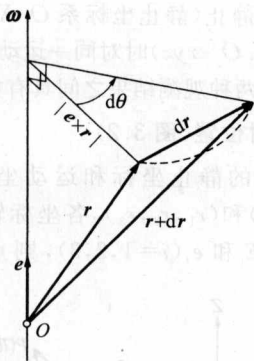


图 3.3 向量旋转

3. 相对加速度

点 P 在静止坐标系中的加速度(绝对加速度)等于速度对时间的微分, 即

$$\begin{aligned}\mathbf{a} &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d\mathbf{v}_0}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}_{\text{rel}} + \boldsymbol{\omega} \\ &\quad \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{\text{rel}} + \frac{d^* \mathbf{r}_{\text{rel}}}{dt}) + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_{\text{rel}} + \frac{d^* \mathbf{v}_{\text{rel}}}{dt}\end{aligned}$$

$$= \mathbf{a}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_{\text{rel}} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{\text{rel}}) + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_{\text{rel}} + \mathbf{a}_{\text{rel}}$$

式中, 右边第 1~3 项为牵连加速度, 表示点 P 与运动坐标系固结在一起时的绝对加速度。第 4 项为哥氏(Coriolis)加速度, 是由于相对速度方向的改变而引起。第 5 项 $\mathbf{a}_{\text{rel}} = d^* \mathbf{v}_{\text{rel}}/dt$ 为点 P 相对于运动坐标系的相对加速度。

3.2 刚体运动

多个质点的集合称为质点系。由无数质点组成且质点间的相对位置保持不变的质点系称为刚体。刚体是不考虑变形时物体的力学抽象。当物体的变形与运动相比很小时, 可近似作为刚体来处理。

3.2.1 自由度、位移及速度

1. 自由度、位移

刚体的空间位置(displacement)和姿态(orientation)可以用刚体上三个点的位置完全确定。由于约束条件有三个, 即三点之间的距离保持不变, 因而三个点的坐标数 9 减去 3(约束条件的个数)得到 6, 此即描述刚体运动所需要的独立变量数, 或者说刚体运动的自由度(degree of freedom)为 6。此外, 还可用一个点的位置和绕三个坐标轴的姿态角来描述刚体的位置。

刚体的位移可以用平移运动和绕各坐标轴的旋转运动来描述。有限的旋转位移不是向量空间, 但是, 如果过任意点 P 的旋转轴选择恰当的话, 位移可以用一个绕该坐标轴的旋转来描述。

2. 速度和瞬时螺旋轴

若刚体在 Δt 内绕点 P 旋转 $\Delta\theta$ 角度, 且平行移动 Δs 时, 速度由以下两个向量确定:

$$\text{旋转角速度 } \boldsymbol{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\text{平动速度 } \mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{dt}$$

式中, $\boldsymbol{\omega}$ 和 \mathbf{v} 可以分别看作是沿旋转轴的线向量(line vector)和只具有方向的自由向量(free vector), 即角速度与点 P 的位置无关, 而速度则随点 P 的位置 \mathbf{r} 而变。设点 P 仅移动 $\Delta \mathbf{r}$ 而得到点 P' , 且该点的速度为 $\boldsymbol{\omega}'$ 和 \mathbf{v}' , 则如图 3.4 所示有

$$\omega' = \omega$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \omega \times \Delta \mathbf{r}$$

$$= \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_n + \omega' \times \Delta \mathbf{r})$$

式中, $\Delta \mathbf{r} = \overline{PP'}$, \mathbf{v}_a 和 \mathbf{v}_n 分别为 \mathbf{v} 平行于和垂直于 $\omega = \omega'$ 的分向量。 $\omega \times \Delta \mathbf{r}$ 为垂直于 ω' 的向量。通过恰当地选择点 P 可使 $\Delta \mathbf{r}$ 满足 $\mathbf{v}_n + \omega' \times \Delta \mathbf{r} = 0$, 从而使 \mathbf{v}' 平行于 ω' ($\mathbf{v}' = \mathbf{v}_a // \omega'$)。这表明刚体的一般空间运动为一个绕瞬时螺旋轴的螺旋运动。

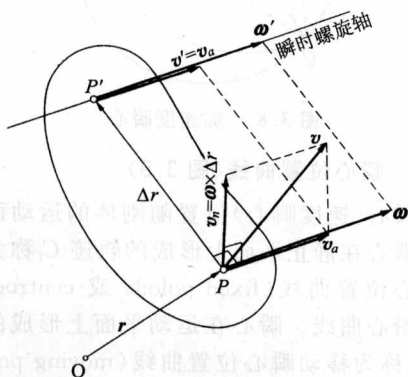


图 3.4 瞬时螺旋轴

3. 运动的合成与分解

平移运动是平动速度(自由向量) $\mathbf{v} = \sum \mathbf{v}_i$ 的合成。因此, 多个旋转和平移运动可以合成为一个绕任意点 O 的旋转 $\omega = \sum \omega_i$ 和一个平移运动 $\mathbf{v} = \sum (\omega_i \times \Delta \mathbf{r}_i) + \sum \mathbf{v}_i$ 。如果 O 点的位置选择恰当, 可使 \mathbf{v} 平行于 ω 。这表明, 即使对刚体同时施加多个旋转和平移运动, 仍然可以将其等效为一个绕某轴的旋转运动和一个沿该轴的平移运动, 即螺旋运动。

4. 表示旋转运动的欧拉角

设在刚体上定义一个运动坐标系 $O-xyz$, 和一个坐标轴平行于静止坐标系且原点与该运动坐标系重合的坐标系 $O-XYZ$ (两者均为右手直角坐标系), 如图 3.5 所示。若两个坐标系之间按照

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \xrightarrow[\text{绕 } Z \text{ 轴 } \varphi]{\textcircled{1}} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \xrightarrow[\text{绕 } y' \text{ 轴 } \theta]{\textcircled{2}} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \xrightarrow[\text{绕 } z'' \text{ 轴 } \psi]{\textcircled{3}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

的顺序进行三次旋转变换, 则三个角 (θ, φ, ψ)

称为欧拉角。两个坐标轴之间欧拉角表示的方向余弦如表 3.1 所示。

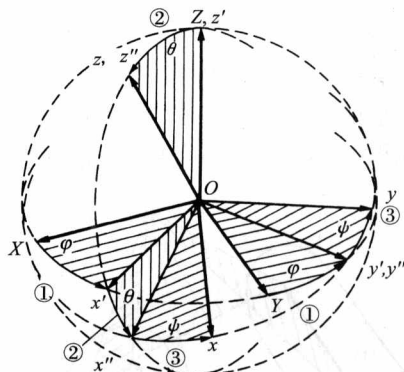


图 3.5 欧拉角

表 3.1 欧拉角表示的方向余弦

	x	y	z
X	$c\theta c\varphi c\psi - s\varphi c\psi$	$-c\theta c\varphi s\psi - s\varphi s\psi$	$s\theta c\varphi$
Y	$c\theta s\varphi c\psi + c\varphi s\psi$	$-c\theta s\varphi s\psi + c\varphi c\psi$	$s\theta s\varphi$
Z	$-s\theta c\psi$	$s\theta s\psi$	$c\theta$

$c: \cos, s: \sin$

3.2.2 平面运动的运动学

若刚体相对于空间内某一平面的姿态和距离都不发生变化, 则称其为平面运动。平面上的刚体位置可以由该刚体上两个点的坐标, 或一个点的坐标和一个姿态角(即刚体上的一个有向线段)唯一确定, 因此它的自由度为 3。

1. 瞬心(速度瞬心)

一般来说, 刚体的有限位移运动 $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{3}$ (图 3.6) 是一个平移运动 $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2}$ 和一个旋转运动 $\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3}$ 的合成。如果点 P_v 选择得恰当, 那么 $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{3}$ 可以用一个绕点 P_v 的旋转运动来表示。该点 P_v 称为极(pole)。若 $\textcircled{1}, \textcircled{3}$ 无限接近, 两者之间的极称为瞬心(instantaneous center)。由于 P_v 的瞬时速度为 0, 故也称其为速度极(velocity pole)。这无非就是在 3.2.1 节 2. 中考虑了瞬时螺旋轴垂直平面上的运动的结果。如果刚体上任意两点的速度方向已知, 便可以利用图解法, 从两点作速度方向的垂线, 两垂线的交点即为瞬心(图 3.7)。以下是与瞬心有关的性质。

$\textcircled{1}$ 对应于给定运动, 瞬心只有一个。平动的瞬心在无限远处。

② 刚体上任意一点的速度方向与以瞬心为原点的位置向量垂直相交,而速度的大小与位置向量的长短成比例($\triangle P_v AA' \sim \triangle P_v BB' \sim \triangle P_v CC'$)。

③ 刚体上多个点的速度向量,连接其终点所形成的多边形与连接其始点所形成的多边形相似($\triangle ABC \sim \triangle A'B'C'$)。

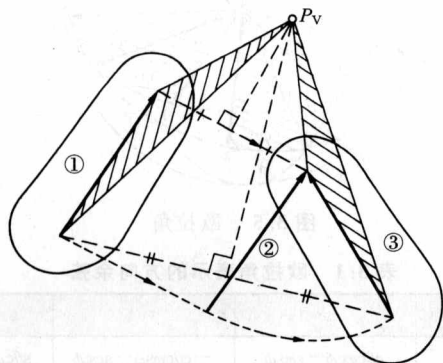


图 3.6 刚体平面运动

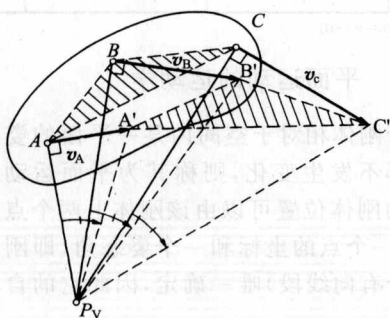


图 3.7 瞬心

2. 加速度瞬心(图 3.8)

刚体上瞬时加速度为 0 的点称为加速度瞬心(acceleration pole)。只有当速度瞬心瞬间静止时,加速度瞬心才与速度瞬心重合。加速度瞬心的性质如下:

① 已知刚体上任意两点的加速度向量时,存在着唯一的一个点,该点与两个加速度向量所形成的夹角相等,此即加速度瞬心(圆 RAB 与圆 $RA'B'$ 的交点 Q)。

② 刚体上任意点的加速度,其方向与以加速度瞬心为原点的位置向量成一定角度,而大小与位置向量的长短成比例($\triangle QAA' \sim \triangle QBB' \sim \triangle QCC'$)。

③ 刚体上多个点的加速度向量,连接其

终点所形成的多边形与连接其始点所形成的多边形相似($\triangle ABC \sim \triangle A'B'C'$)。

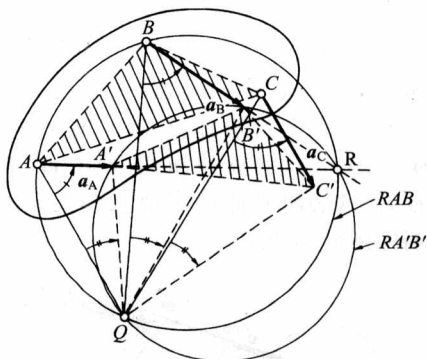


图 3.8 加速度瞬心

3. 瞬心位置曲线(图 3.9)

瞬心(速度瞬心)位置随刚体的运动而改变。瞬心在静止平面上形成的轨迹 C_f 称为静止瞬心位置曲线(fixed polode 或 centrode),或静瞬心曲线。瞬心在运动平面上形成的轨迹 C_m 称为移动瞬心位置曲线(moving polode 或 centrode),或动瞬心曲线。两曲线在瞬心处滚动相切。刚体上的点 P 在复数静坐标系($O-XY_i$)和动坐标系中的位置具有如下关系:

$$P = R + pe^{i\theta}$$

式中, R 为点 O' 的绝对位置; p 为点 P 的相对位置。

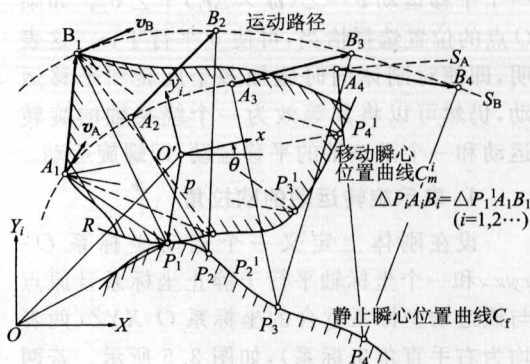


图 3.9 瞬心位置曲线

当点 P 为瞬心时,其速度为 0,即

$$\dot{P} = \dot{R} + ipe^{i\theta} \dot{\theta} = 0$$

于是,动瞬心曲线和静瞬心曲线分别成为

$$p = i \frac{\dot{R}}{\dot{\theta}} e^{-i\theta}, \quad P = R + i \frac{\dot{R}}{\dot{\theta}}$$

4. 速度瞬心与加速度瞬心的关系(图 3.10)

设平面运动的刚体 b 在静坐标系 a 中的静、动瞬心曲线分别为 C_f 、 C_m ，两曲线在切点 P (速度瞬心) 处的曲率圆 (瞬心曲率圆) O_a 、 O_b 的半径分别为 r_a 、 r_b ，则刚体上任一点 A 所画出的轨迹曲线 S ，可瞬时看作圆 O_b 绕 O_a 滚动所形成的摆线。若曲线 S 的曲率半径为 ρ (曲率中心为 O_c)， \overline{PA} 的长度为 p ，瞬心位置曲线与公切线之间的夹角为 ν ，则如下的 Euler-Savary 公式成立：

$$\left(\frac{1}{\rho-p} + \frac{1}{p}\right) \sin \nu = \frac{1}{d} (= \text{定值})$$

若 $\rho \rightarrow \infty$ ，可得瞬时轨迹位于刚体上的变曲率点：

$$p = d \sin \nu$$

其集合为一直径为 d 的圆 (变曲率点圆, inflection circle)。轨迹上切线加速度为 0 的点同样也可用圆表示如下 (瞬心切线圆, circle of pole tangent)：

$$p = \frac{r_0 \dot{\theta}^2}{\ddot{\theta}} \cos \nu$$

θ ：从 O_a 、 P 、 A 共线时的位置开始向 $\overrightarrow{O_a P}$ 的转角。

由各位置在刚体上所画这两个圆的交点 (其中一个为 P) 处的加速度为 0，此即加速度瞬心。

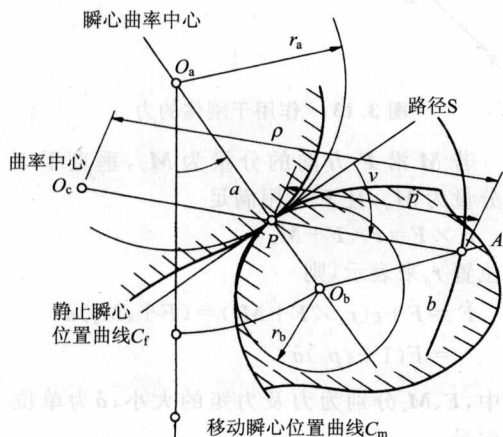


图 3.10 速度瞬心与曲率中心

3.3 刚体力学

工程上常见的力包括物体间的作用反作用力和势场中的保守力。从物体受力的角度来看，可分为外部作用于物体的外力和作用

在物体截面之间的内力。

对于刚体来说，由于不存在变形，所以不必考虑内力。作用于刚体上的外力，根据受力处的几何形状，可以分为作用于刚体体积元素上的体积力 (如重力)，作用于接触表面面积元素上的面力 (如流体压力)，作用于接触轮廓线元素上的力 (如液体表面的表面张力)，以及与刚体接触时所产生的其他力。

3.3.1 静力学

静力学的主要内容包括：当刚体作无加速度的运动时，用等效的简单力系代替前述复杂的力系，以及力系的平衡等问题。

1. 力的合成与分解

当有多个力作用于刚体时，用尽量简单的等效力系来代替原力系，称为力的合成。反之，称为力的分解。如作用于点 P_i 的力 F_i ，可作用于原点 O (或其他任意点) 的力 F_i 和力偶 $N_i = r_i \times F_i$ 来代替。对于多个力 F_1, F_2, \dots ，通过力的平移，可以合成为作用于原点的力 $F = \sum F_i$ 和力偶 $N = \sum N_i = \sum (r_i \times F_i)$ 。

若作用于刚体上的各个力平衡，必有 $F = \sum F_i = 0, N = \sum (r_i \times F_i) = 0$ 。此时，尽管刚体受到力的作用，但如果仅从运动的角度来看，和未受力是一样的。这时称刚体处于平衡状态。此时的刚体或静止或保持匀速直线运动。

2. 平面运动刚体的力平衡

下面分析多个刚体通过运动副连接后组成的系统在力、力矩方面的平衡问题。由于平面力向量和力矩向量垂直相交，若不计力偶，如果把力矩量 (motor) 轴取成力的作用线，那么力矩将不会出现。一般来说

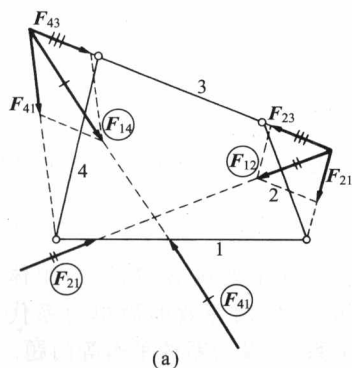
① 两个刚体间的作用力与反作用力必共线，且大小相等，方向相反。

② 作用于刚体上的两个力若平衡，则必共线，且大小相等，方向相反。

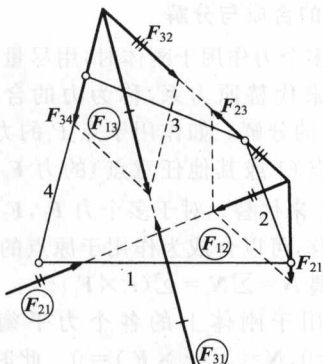
③ 作用于刚体上的三个力若平衡，则它们至少汇交于一点。

例如，平面 4 连杆机构 (均为转动副) 中，当连杆 i, j 之间施加力 F_{ij} 或力矩 M_{ij} 而使机构保持平衡时，各连杆的受力如图 3.11 所示。满足上述性质②的连杆为图 3.11(a) 中的连杆 3、图 3.11(b) 中的连杆 4，以 3.11 及

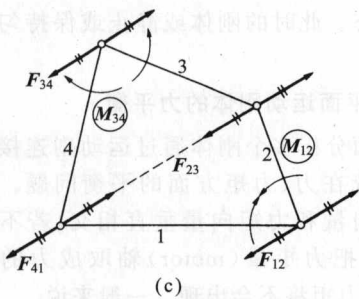
图 3.11(c) 中连杆 1 和 2 的结合体。作为输入输出而施加的力的数量等于自由度+1。当作用力的数量超过该数值时,服从叠加原理。



(a)



(b)



(c)

图 3.11 作用于机构的力和力矩

3.3.2 运动的传递特性(transmissibility)

刚体受力产生位移时,力作用线的方向与作用点运动方向之间的夹角 α 称为压力角 (pressure angle) (余角称为传递角, transmission angle), 如图 3.12 所示。从力学角度来看,力是线向量,故其作用点无法唯一确定。因此,压力角只有在力为点约束向量时才有

意义。当作用力为力矩时也是如此。

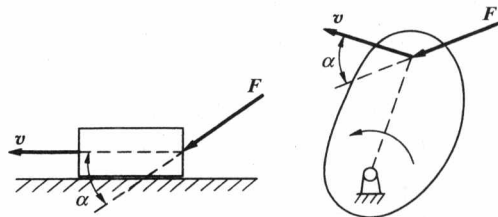


图 3.12 压力角

刚体上任一点 r 处同时作用有力 F 和力矩 M 时,可定义如下的力矩量:

$$\hat{F} = F + \epsilon(r \times F + M) \quad (\epsilon^2 = 0)$$

式中, F 为一元部(合成向量, resultant vector); $r \times F + M$ 为二元部(力矩向量, moment vector)^[5] (图 3.13)。

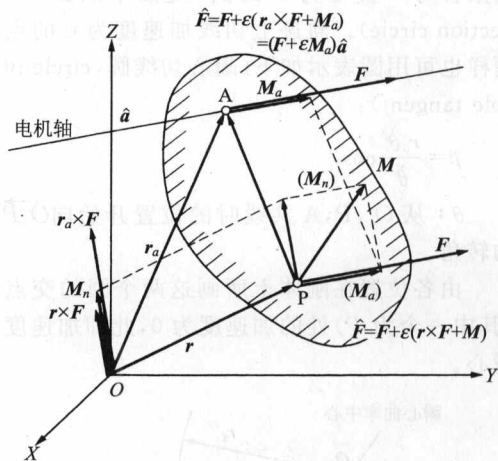


图 3.13 作用于刚体的力

若 M 沿 F 方向的分量为 M_a , 垂直于 F 的分量为 M_n , 且 F 可用满足

$$r_a \times F = r \times F + M_n$$

的位置 r_a 来表示, 则

$$\begin{aligned} \hat{F} &= F + \epsilon(r_a \times F + M_a) = (F + \epsilon M_a) \hat{a} \\ &= F(1 + \epsilon p_f) \hat{a} \end{aligned}$$

式中, F, M_a 分别为力及力矩的大小; \hat{a} 为单位线向量。

此时, F 的作用线 a 为力矩量 \hat{F} 的轴, 该轴上的力 F 和力矩 M_a 同向。二者的数值比 $p_f = M_a / F$ 称为力节距 (pitch)。

在力矩量 \hat{F} 的作用下, 刚体以速度矩量

$$\tilde{V} = (\omega + \epsilon v) \hat{b} = \omega(1 + \epsilon p_v) \hat{b}$$

式中, v, ω 分别为速度、角速度的大小; $p_v (= v/\omega)$: 位移的节距; \hat{b} 为表示瞬时螺旋的单位线向量(图 3.14), 此时传给刚体的动力为

$$P = \text{Dual}(\hat{F} \cdot \hat{V}) \\ = F\omega[(p_f + p_v)\cos\beta - r\sin\beta]$$

式中, γ, β 分别为 \hat{a}, \hat{b} 间的距离及扭转角。

在上式中, 不改变力 \hat{F} 的大小和作用点, 只改变方向所得到的最大动力之比如下式:

$$TI = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{|(p_f + p_v)\cos\beta - r\sin\beta|}{\sqrt{(p_f + p_v)^2 + (r_{\max})^2}}$$

称之为传递系数 TI (transmission index)^[6]。 $0 \leq TI \leq 1$, TI 越大, 运动的传递性越好。 $TI = 0$ 时无法向刚体传递动力(机构奇异点), $TI = 1$ 时动力传递性最好。在图 3.12 的力系中, $TI = \cos\alpha$ 。

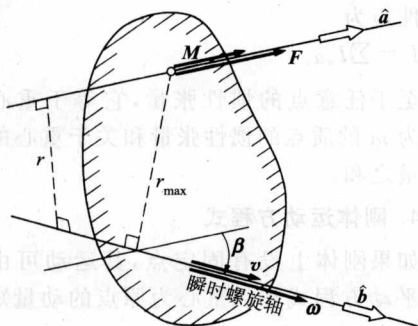


图 3.14 传递系数

3.3.3 动力学

1. 运动定律

物体属性和环境、运动状态之间满足一定的法则。在人类肉眼所能观察到的运动范围内, 人们通过大量的实验和各种实验数据, 发现质点所受环境作用(F)与质点加速度(a)成比例(牛顿第二定律), 即

$$ma = F$$

式中, 比例系数 m 称为物体的质量; 环境作用 F 称为力。同时, 由于该式描述了质量为 m 的物体的运动, 故称之为运动方程式。满足上述定律的坐标系称为惯性坐标系。伽利略-牛顿力学建立在以下两个原理和两个假设之上。

原理 1(方向相对性原理) 空间内的所有方向在物理学上是同等的。

原理 2(特殊相对性原理) 自然法则在所有惯性坐标系中是一致的。

假设 1(时间绝对性) 时间在所有惯性坐标系中按照相同的方向变化。

假设 2(长度绝对性) 长度在所有的惯性坐标系中保持不变。

假设 2 表示空间中物体的定位法则服从欧氏几何, 即两个笛卡尔坐标系 $\{x_i\}$ 和 $\{\bar{x}_i\}$ 之间的变换满足如下的正交一次变换:

$$\bar{x}_i = a_i + \sum_j b_{ij} x_j, \quad \sum_i b_{ij} b_{ik} = \delta_{jk}$$

(克罗内克符号)

由假设 1, 2 可推导出, 作为时间函数的坐标系的平移运动 $(x_i, t) \rightarrow (\bar{x}_i, \bar{t})$ 服从如下的伽利略变换:

$$\bar{x}_i = x_i - a_i - b_i t, \quad \bar{t} = t - b$$

即牛顿运动方程式相对于伽利略变换具有协变性。

2. 质点运动方程式

惯性坐标系内位于位置 r 处的质点(质量 m)上作用有外力 F 时, 牛顿运动方程式可写成

$$m = \frac{d^2 r}{dt^2} = m \ddot{r} = F$$

或用表示质点运动状态的量, 即动量(momentum) $Q = mv$ 表示为

$$\frac{d}{dt}(mv) = F (= \sum F_i)$$

求解关于原点 O 的矩, 得到

$$r \times \frac{d}{dt}(mv) = r \times F$$

于是

$$\frac{dH}{dt} = M, \quad H = r \times mv, \quad M = r \times F$$

式中, M 为力 F 关于 O 点的力矩; H 为动量关于 O 点的矩, 称为动量矩(angular momentum)或动量效率。

此式称为动量矩方程式。

运动方程式 $F = m\dot{v}$ 对时间的积分(动量积分)为

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1$$

其中, 左边称为冲量, 它等于动量的变化。若沿某路径(线元 ds)进行线积分(能量积分), 则有

$$\int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds = m \int_{v_1}^{v_2} v dv = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2$$

左边为力作所做的功,它等于动能的变化。如果同时考虑保守力引起的势能,则机械能的变化应该等于外力所做的功。

3. 刚体的动量与动能

将刚体看作由质量 dm 所组成的质点系,且设质点位置为 \mathbf{r} ,速度为 \mathbf{v} ,总质量为 M ,重心位置为 $\mathbf{r}_G (= \frac{1}{M} \int \mathbf{r} dm)$,速度为 $\mathbf{v}_G (= \dot{\mathbf{r}}_G)$,则刚体的动量为

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \int \mathbf{v} dm \\ &= M\mathbf{v}_G \end{aligned}$$

设刚体(过原点)的角速度向量为 $\boldsymbol{\omega}$,则动量矩为(图 3.15)

$$\mathbf{H} = \int [\mathbf{r} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})] dm$$

$$= \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} \begin{pmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{pmatrix} \boldsymbol{\omega}$$

$I_{ij} = \lambda \delta_{ij} - C_{ij}$, $\lambda = \int r^2 dm$, $C_{ij} = \int x_i x_j dm$ 式中, $I_{ij} = \int (x_{i+1}^2 + x_{i+2}^2) dm$ 称为(关于 x_i 轴的)惯性矩(moment of inertia), $I_{i+1} = I_{i+1}$ $= -\int x_i x_{i+1} dm$ 称为惯性积(product of inertia)。

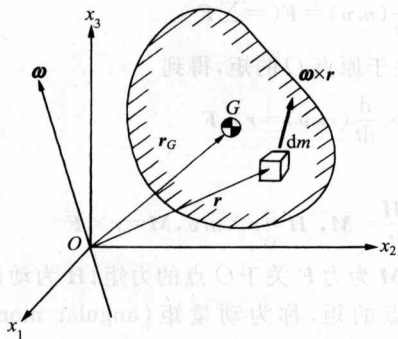


图 3.15 刚体的动量矩

动能为

$$T = \frac{1}{2} \int v^2 dm$$

假设没有平动速度,且 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$,则动能为

$$T = \frac{1}{2} \int (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 dm = \frac{1}{2} \sum_{i,j} I_{ij} \omega_i \omega_j$$

式中, λ 为标量。由于 δ_{ij} , C_{ij} 为张量的元素,

故 I_{ij} 也是张量的元素。对称张量 \mathbf{I} 称为惯性张量(inertia tensor)。

因此,对于向量 $\mathbf{x} = \{x_i\}$, $\mathbf{y} = \{\sum_j A_{ij} x_j\}$ 的内积为 1 的有心 2 次曲面

$$\sum_{i,j} I_{ij} x_i x_j = 1$$

或者将主轴 ζ_i 取成坐标轴

$$\sum_i I_{ij} \zeta_i = 1$$

都会发现上述两式均与坐标系无关,或者说二者均为刚体的固有性质。有心 2 次曲面称为惯性椭球面, ζ_i 称为惯性主轴, I_{ii} 称为主惯性矩。若取惯性主轴 ζ_i 为坐标轴,角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 沿坐标轴的分量为 $\{\omega_i\}$,则动量矩和动能可分别表示为

$$\mathbf{H} = \{I_{ij} \omega_j\}, \quad T = \frac{1}{2} \sum_i I_{ii} \omega_i^2$$

于是,相对于过原点,方向余弦为 α_i 的轴的惯性矩为

$$I_a = \sum_i I_{ii} \alpha_i^2$$

至于任意点的惯性张量,它等于重心处质量为 m 的质点的惯性张量和关于重心的惯性张量之和。

4. 刚体运动方程式

如果刚体上没有固定点,其运动可由如下的平动方程式和以重心为原点的动量矩方程式确定。

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \mathbf{F}, \quad \frac{d\mathbf{H}_G}{dt} = \mathbf{M}_G$$

式中, \mathbf{H}_G , \mathbf{M}_G 分别为关于重心的动量矩和外力的力矩。

如果刚体上有固定点,其运动仅用关于该固定点的动量矩方程式即可确定。

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{M}$$

如果给定了外力矩 \mathbf{M} ,那么只需将坐标系取在惯性主轴 $\{\zeta_i\}$ 上,并写出相应的动量矩方程式即可求解刚体的角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 。由于坐标系的角速度为 $\boldsymbol{\omega}$,设 $\mathbf{H} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$,并利用 3.1.2 节的微分,即可得到

$$\frac{d}{dt} \mathbf{H} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{M}$$

故得到欧拉方程式(Euler equation)

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}$$

5. 达朗贝尔原理与惯性力

运动方程式可改写为

$$\mathbf{F} + \left(-\frac{d\mathbf{Q}}{dt}\right) = 0, \quad \mathbf{M} + \left(-\frac{d\mathbf{H}}{dt}\right) = 0$$

即分别把 $-d\mathbf{Q}/dt$, $-d\mathbf{H}/dt$ 作为力(惯性力或惯性阻力)和力矩(惯性转矩或惯性阻力矩)来考虑,就称为达朗贝尔原理。利用达朗贝尔原理可以将以一定加速度运动的刚体作为静力学问题来分析。

对于平面运动,惯性力为线向量。其作用线与连接刚体重心 G 和加速度瞬心 Q 的直线的交点 E 即为惯性力的作用点(图 3.16)。该作用点称为惯性中心。若假设质量为 m , 绕重心的惯性矩为 I_G , 旋转半径为 k ($I_G = mk^2$), 刚体角位移为 θ , 重心加速度的大小为 a , 且 $QG = q$, $GE = e$, 则可求出惯性中心为

$$e = \frac{M_e}{F_e \cos\theta} = \frac{-I_G \ddot{\theta}}{-ma \cos\theta} = \frac{I_G}{mq} = \frac{k^2}{q}$$

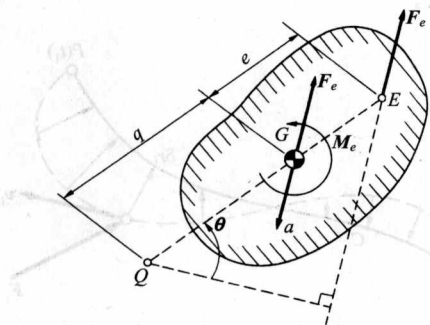


图 3.16 惯性中心

若轴对称旋转体改变了空间旋转轴的方向,那么由哥里奥利加速度将引起的惯性力偶。该惯性力偶称为陀螺力矩(图 3.17)。

设绕旋转轴的主惯性矩为 I , 角速度为 μ , 旋转轴的旋进角速度为 ω , 则陀螺力矩可表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{H} \times \boldsymbol{\omega} = I\boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{\omega}$$

反之,由于力矩 \mathbf{M} 的作用也会产生角速度为 ω 的旋进运动(precession)。

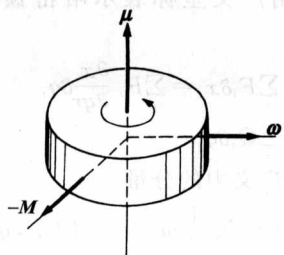


图 3.17 陀螺力矩

3.3.4 具体例子

1. 惯性矩

物体绕轴 A 的惯性矩等于物体微元体的质量 dm (或 m_i) 与该微元体到轴 A 的距离 a (或 ρ_i) 的平方之积的总和, 即

$$I_A \int a^2 dm = \sum m_i \rho_i^2$$

惯性矩具有如下的重要性质, 即绕任意轴的惯性矩 I 可用绕平行于该轴且过重心的直线的惯性矩 I_G 和两轴间距 h 表示出来, 如下式:

$$I = I_G + Mh^2$$

式中, M 为总质量 $\sum m_i$ 。

由于刚体的旋转运动方程式中常常出现惯性矩, 故在此举一个惯性矩的例子。

设矩形板的长、宽、高分别为 a 、 b 、 c , 通过矩形板重心 G 的直角坐标系的三个坐标轴 x 、 y 、 z 分别沿长、宽、高方向设定, 则绕 z 轴的惯性矩 I_z 为

$$\begin{aligned} I_z &= \frac{(\gamma/g)(abc)(a^2 + b^2)}{12} \\ &= \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \end{aligned}$$

式中, γ 为单位体积的重量; g 为重力加速度。

2. 二级摆运动方程式

设图 3.18 中二级摆的质量为 m , 绕重心 G 的惯性矩为 I , 下标 1 和 2 为两个振子的编号。振子 L_1 绕固定轴 O 旋转。若作用于关节 J_2 上的力的 x 、 y 分量分别为 F_x 、 F_y , 则 L_1 的运动方程式为

$$(I_1 + m_1 h_1^2) \ddot{\theta}_1 = m_1 g_1 h_1 \sin\theta_1 + F_x l \cos\theta_1 - F_y l \sin\theta_1$$

振子 L_2 的平动方程式由下式给出:

$$m_2 \ddot{x}_2 = -F_x$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = -F_y + m_2 g$$

振子 L_2 绕重心的旋转运动方程式为

$$I_2 \ddot{\theta}_2 = F_x h_2 \cos\theta_2 - F_y h_2 \sin\theta_2$$

而约束条件为

$$x_2 = l \sin\theta_1 + h_2 \sin\theta_2$$

$$y_2 = l \cos\theta_1 + h_2 \cos\theta_2$$

该约束条件对时间进行两次微分将得到 2 个式子, 再加上前边的 4 个式子共有 6 个式

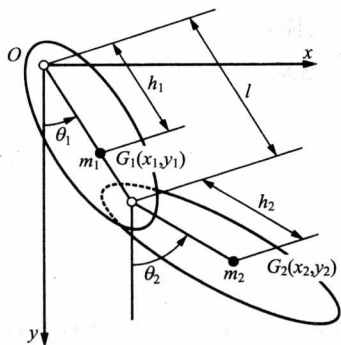


图 3.18 二级摆

子。从这 6 个式子中消去约束力 F_x 、 F_y 和 \ddot{x}_2 、 \ddot{y}_2 ，即可求出 $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_2$ 。当给定 θ_1 、 θ_2 和 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$ 的初始条件后，求解上述微分方程式，即可得到各连杆的速度和加速度。

3.3.5 分析力学

1. 虚功原理

当质点上作用有外力 \mathbf{F} 和惯性力 $-m\dot{\mathbf{v}}$ 且处于平衡状态时，若给定质点一个任意的假想位移 $\delta\mathbf{r}$ ，则各力所做假想功（虚功）的总和应该为 0，即

$$(\mathbf{F} - m\dot{\mathbf{v}}) \cdot \delta\mathbf{r} = 0$$

若质点受有约束，则对于各自由度的假想位移，约束力所作的功为 0。由于满足以下约束条件

$$f_\nu(x_1, x_2, x_3, t) = 0 \quad (\nu = 1, \dots, k < 3)$$

的位移 $\delta\mathbf{r}$ 由

$$\nabla f_\nu \cdot \delta\mathbf{r} = 0$$

给出，若引入待定常数 λ_ν ，则虚功原理可表示为

$$(\mathbf{F} - m\dot{\mathbf{v}} + \nabla f_\nu) \cdot \delta\mathbf{r} = 0$$

当质点位于保守力场，且势场为 U 时，保守力的虚功为

$$\delta W = -\nabla U \cdot \delta\mathbf{r} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}} \delta\mathbf{r}$$

式中， $\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}}$ 为 U 沿 $\delta\mathbf{r}$ 方向的梯度。则稳定平衡的条件为 $U = U(\mathbf{r})$ 在该处取极小值。

虚功原理对于质点系和刚体也同样成立。

2. 哈密顿 (Hamilton) 原理

当质点系受外力 \mathbf{F}_i 作用，且沿路径 C 以一定的加速度运动时，虚功原理对于路径 C 的极小偏差 $\delta\mathbf{r}$ 在各个时刻下式均成立 (图 3.19)：

$$[\sum \mathbf{F}_i + \sum (-m_i \dot{\mathbf{v}}_i)] \cdot \delta\mathbf{r}_i = \sum \mathbf{F}_i \cdot \delta\mathbf{r}_i + \sum m_i \mathbf{v}_i \cdot \delta\mathbf{v}_i - \frac{d}{dt} \sum m_i \mathbf{v}_i \cdot \delta\mathbf{r}_i$$

右边第 1 项为外力的虚功 δW ，第 2 项为动能 $T = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2$ 的增量。若时刻 t_0 和 t 的虚位移 $\delta\mathbf{r}_i = 0$ ，可得

$$\delta \int_{t_0}^t (W + T) dt = 0$$

若力 \mathbf{F}_i 的势场为 U ，由 $\delta W = -\delta U$ ，得

$$\delta \int_{t_0}^t (T - U) dt = \delta \int_{t_0}^t L dt = 0$$

即在真实运动 (轨迹 C) 中，对积分 $\int L dt$ 取极值。这时，即使运动发生微小的变化，其积分值也不会产生 1 阶变化 (变分原理)。这里的函数 L 称为拉格朗日函数 (Lagrangian) 或运动势能。

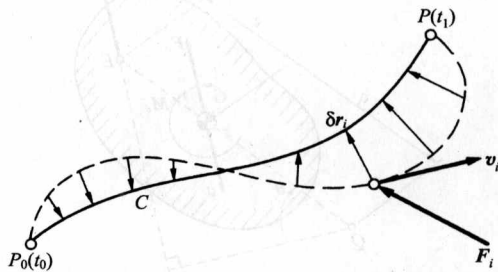


图 3.19 哈密顿 (Hamilton) 原理

3. 拉格朗日 (Lagrange) 运动方程式

当由 n 个质点所构成的质点系的位置可以用任意变量 q_r ($r = 1, 2, \dots, 3n$) 唯一表示时，称这些变量为广义坐标。它与直角坐标之间的函数关系为 (t 为时间)

$$x_i = x_i(q_1, q_2, \dots, q_{3n}, t)$$

$$\dot{x}_i = \sum_r \frac{\partial x_i}{\partial q_r} \dot{q}_r + \frac{\partial x_i}{\partial t} \quad (i = 1, 2, \dots, 3n)$$

下面用广义坐标表示哈密顿原理。首先，虚功为

$$\begin{aligned} \delta W &= \sum_i \mathbf{F}_i \delta x_i = \sum_{i,r} \mathbf{F}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_r} \delta q_r \\ &= \sum_r \mathbf{Q}_r \delta q_r \end{aligned}$$

式中， \mathbf{Q}_r 为广义力的分量。

动能 $T = \sum \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 = T(q_r, \dot{q}_r, t)$ 的变分为

$$\delta T = \sum_r \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \delta \dot{q}_r + \sum_r \frac{\partial T}{\partial q_r} \delta q_r$$

由于有 $\delta \dot{q}_r = (d/dt)\delta q_r$, 故有

$$\delta T = \sum_r \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \frac{d}{dt}(\delta q_r) + \sum_r \frac{\partial T}{\partial q_r} \delta q_r$$

于是

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \delta T dt &= \int_{t_0}^{t_1} \sum_r \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \frac{d}{dt}(\delta q_r) \\ &\quad + \int_{t_0}^{t_1} \sum_r \frac{\partial T}{\partial q_r} \delta q_r \\ &= \left[\sum_r \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \delta q_r \right]_{t_0}^{t_1} \\ &\quad - \int_{t_0}^{t_1} \left[\sum_r \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) \delta q_r \right] dt \\ &\quad + \int_{t_0}^{t_1} \sum_r \frac{\partial T}{\partial q_r} \delta q_r dt \end{aligned}$$

考虑到 $t=t_0, t_1$ 时 δq_r 等于 0, 故有

$$\int_{t_0}^{t_1} \delta T dt = \int_{t_0}^{t_1} \sum_r \left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_r} \right] \delta q_r dt$$

再由哈密顿原理得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} (\delta W + \delta T) dt \\ = \int_{t_0}^{t_1} \sum_r \left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_r} + Q_r \right] \delta q_r dt \\ = 0 \end{aligned}$$

当约束条件为 $f_\nu(q_1, q_2, \dots, q_{3n}) = 0$ 时, 同样引入待定常数 λ_ν , 则上述关系变成如下形式:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_r} = Q_r + \sum_\nu \lambda_\nu \frac{\partial f_\nu}{\partial \dot{q}_r}$$

$$(r = 1, 2, \dots, 3n; \nu = 1, 2, \dots, k < 3n)$$

或 $q_r = c_r$ (定值) 时, 取满足 $f_\nu = 0$ 的 k 个广义坐标, 对于该广义坐标, $\delta q_r = 0$, 而对于其他 $f = 3n - k$ 个 q_r , δq_r 为任意值, 故有

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_r} = Q_r \quad (r = 1, 2, \dots, f)$$

此即基于广义坐标的运动方程式, 称为基于广义坐标的拉格朗日方程式。当质点系的受力能由势场 $U(q, t)$ 求出时, 利用拉格朗日函数 $L = T - U$, 有

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_r} = 0$$

即, 若拉格朗日函数可写成 q_r, \dot{q}_r, t 的函数时, 由上式可立即改写成运动方程式的简捷形式。

堀本三喜男

参考文献

3. 力学基础
- [1] 日本機械学会: 新版機械工学便覧; 力学, 機械力学編 (1986)
- [2] 山内恭彦: 一般力学 (增訂 3 版), 岩波書店 (1957)
- [3] 青木弘, 長松昭男: 新編工業力学, 養賢堂 (1979)
- [4] 小川潔: 機構学, 朝倉書店 (1967)
- [5] L. Brand: Vector and Tensor Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York (1962)
- [6] G. Sutherland and B. Roth: Trans. ASME, Ser. B, Vol.95, No.2 (1973) p.589

第4章 控制基础

本章将对控制的思想方法和控制系统的设计步骤作一概述。首先讲解古典控制理论和现代控制理论的基础知识,然后介绍几种其他的控制理论。

4.1 控制引论

本节将阐述控制的思想方法、控制系统设计的定义,以及控制系统的设计步骤等。

4.1.1 什么是控制

汉字“控”、“制”两个字都含有“对某种对象按照某种要求进行操纵”的含义。从这个意义上来说,人类,甚至自然界从远古时代就开始了“控制”(control)。例如,著名的古代欧洲风车、瓦特的蒸汽机等。甚至可以说,现代很多的家电产品、汽车、火车、飞机、机器人等,几乎所有能“动”的人造物,从某种意义上来说都是被控制的。

当然,控制的想法不仅存在于上述特定的人造物,通过下面的例子还可以看出,控制实际上已经渗透到了我们的日常生活中。

【举例:人们的关系】

在日常生活中,常常需要请求别人完成某项工作。这时,我们应根据被请求者的性格和处境,采用委婉的方式将意思传达过去,并在必要的时候给予适当的指示。如果被请求者很好地完成了工作,就可以说是控制了对方。

这时需要注意的是,在实施控制时,其背后一定具有某种目的(控制目的),而控制就是要对给定对象实施操纵以达成预定的目的。

可见,“控制”这一概念的含义是非常广义的,而“控制理论”就是研究那些渗透于“控制”中的、具有普遍意义的控制原理。

4.1.2 控制系统的结构

观察控制的过程,从中可以得知存在如下两种控制策略。

1. 反 馈

这里以汽车驾驶为例进行说明。

【举例:汽车】

设想有这样一个场景,即要求驾驶汽车沿着道路的中心线行驶。为此,司机需要根据道路情况和汽车的运行状态不断操作方向盘。当汽车中心偏向道路中心线的左侧(比较)时,司机就会作出向右旋转方向盘(判断)的判断,然后用手把方向盘向右打(操作)。反之,若汽车向右偏斜,则向左打方向盘。驾驶员反复进行上述一系列动作,即可实现预期目标(控制)。

这个例子中的控制结果连续不间断地返回到驾驶员那里,因此称此为反馈控制(feed-back control)。同时,由[操作]—[结果]—[观察]—[比较]—[判断]—[操作]等动作构成一个闭环,故反馈控制又称为闭环控制(closed loop control),如图4.1所示。

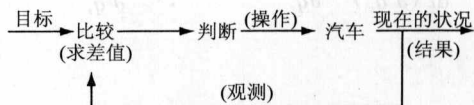


图 4.1 反馈控制

2. 前 馈

下面是第二个例子。

【举例:水桶】

设想通过水管将自来水注入水桶。如果水龙头开口度与自来水流量之间的关系已知,就可以计算出水龙头拧到什么程度、用多长时间能够装满水桶。根据计算结果进行水龙头开口度规划,然后按照规划实施操作即可达成预定目标。

这个例子中,从目标状态的设定到控制结果的作用方向始终是向前的,故称为前馈控制(feedforward control),如图4.2所示。由图4.2可知,其中没有反馈控制那样的循环动作,因此称为开环控制(open loop control)。

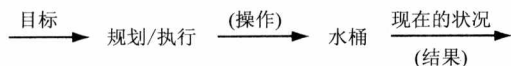


图 4.2 前馈控制

3. 反馈与前馈

下面对反馈和前馈两大控制方式的特征加以说明和比较。

前馈控制中,由于不用检测操作结果,因而不需要传感器,也不必构成闭环,结构简单。但是,由于规划出的函数在作业中保持不变,对于由无法预料的因素引起的目标水位与实际水位的误差难以进行修正。在反馈控制中,操作结果总会在下一次的操作中反映出来,因此与前馈控制相比,具有较强的抵抗外部干扰(环境的变化等)的能力。但其结构也变得较为复杂。

当控制精度要求不高时,常常使用前馈控制。实际上,比较便宜的家电中大多应用前馈控制。但当控制精度和性能要求较高时,就需要采用反馈控制。此时不但应注意控制系统的稳定性,而且需要相应的理论体系。下面主要介绍反馈控制。

4. 方框图

控制工程中,常常采用方块图来描述各种对象,而不是使用“实物图”。图 4.3(a)为描述电流流入电机导线和电机输出转矩的实物图。从功能表现的角度出发,则可画成图 4.3(b)(矩形方框中写出要素的功能,输入和输出用箭头表示),称之为方框图(block diagram)。信号的加减运算和分支的描述如图 4.4 所示。



图 4.3 方框图

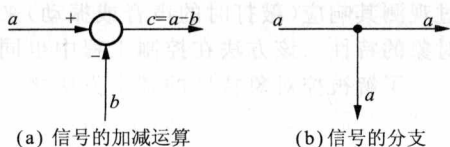


图 4.4 信号的加减运算和分支

4.1.3 控制系统设计

下面来研究实施控制的标准结构。在具体考虑“控制”问题时,首先应该明确控制的对象和目标(控制目标)。控制的对象统称为被控对象(controlled object)。在进行控制时,需要从被控对象的若干物理量(位置、角度、温度等)中选择希望控制的量,称之为控制量(controlled variable)。为了控制被控对象,必须要施加某种操作,称其为操作量(manipulated variable)(对于单个被控对象,其操作量称输入(input),控制量称为输出(output))。为了恰当确定操作量的大小,需要利用某些与控制量密切相关的物理量的信息,称其为被测量(measured variable)(有时与控制量相同)。

一般情况下,除了操作量,还有其他一些不确定的因素作用于被控对象,这些因素统称为扰动(disturbance)。为了实施控制,必须采取某种策略对被控对象进行操作,实现该功能的单元称为控制器(controller)。控制器内含有控制算法(控制规则(control law))它根据实测值与目标值(set point)之差(操作信号)确定施加于被控对象的操作量。用图形来描述上述内容,得到图 4.5(扰动施加的位置可以有很多,但施加到操作量上是一种较为普遍的做法)。

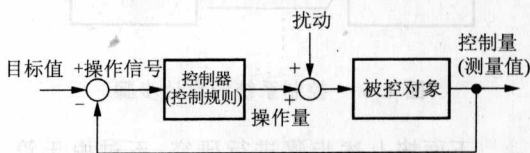


图 4.5 反馈控制系统的标准结构

设定控制目标时需要考虑如下问题:

- ① 不稳定被控对象的稳定性问题(稳定性的定义参阅 4.2.1 节);
- ② 使控制量与目标值一致;
- ③ 降低扰动对控制量的影响。

被控对象和控制器构成的系统称为控制系统(control system)。控制系统的建立过程称为控制系统的设计。很多时候,除了控制器,其他部分均是已知的,于是就将控制器的设计(即控制规则的设计)称为控制系统设计。具有图 4.5 所示结构的系统被称为反馈控制系统的标准结构(standard structure of

feedback control system)(在研究具有反馈和前馈的2自由度控制系统和 H_∞ 控制等时,将该结构扩展到一般形式。相关内容参阅4.4节)。

当被控对象给定后,可以按照如下基本步骤进行控制系统设计:

步骤1 给定现实世界中的被控对象和控制目标。

步骤2 建立书面被控对象,即数学模型(建模(modeling))。

步骤3 以数学模型为基础对被控对象进行分析,并根据分析结果设计控制规则(设计(design))。

步骤4 将书面控制规则(以数学公式表达的)变成现实世界中的控制器(实现(realization))。

步骤5 将控制器安装到被控对象上,完成控制系统(实际安装(implementation))。

以上步骤可用图4.6来描述。

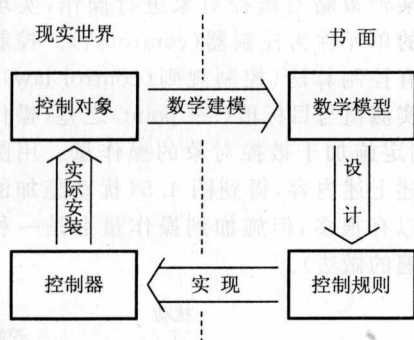


图 4.6 控制系统的设计步骤

下面按上述步骤进行研究,不过由于篇幅所限,仅介绍了步骤2和步骤3。这里只是大致的流程,详细内容参阅文献[1],[2]。

4.2 建模

控制规则设计的第一步就是建模。其目的是了解被控对象特性,并据此进行控制规则设计。本节将介绍数学建模的相关基础知识。

4.2.1 被控对象

控制工程中,常常把被控对象作为线性系统(下面进行定义)来考虑。之所以把实际上非常复杂的现实系统作为线性系统来对

待,是由于线性系统具有的几个非常方便的性质。其中最重要的是叠加原理。

[叠加原理] 设对于给定的两个输入,某被控对象(初始输出为0)的输出分别定义为

$$y_1(t) = \{\text{输入为 } u_1(t) \text{ 时的输出}\}$$

$$y_2(t) = \{\text{输入为 } u_2(t) \text{ 时的输出}\}$$

此时对相同的被控对象施加合成输入

$$u(t) = \alpha u_1(t) + \beta u_2(t)$$

(α, β 均为任意的正常数)

时,若输出为

$$y(t) = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$$

则称被控对象满足叠加原理(principle of superposition)。满足叠加原理的系统称为线性系统(linear system)。

今后,如果没有特别说明,被控对象均为线性系统。这时,被控对象输入与输出之间的关系可以用如下的线性微分方程组来描述:

$$\begin{aligned} \frac{d^n}{dt^n}y + a_{n-1}\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}y + \cdots + a_1\frac{d}{dt}y + a_0y \\ = b_{n-1}\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}u + b_{n-2}\frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}}u + \cdots + b_1\frac{d}{dt}u \\ + b_0u \end{aligned} \quad (4.1)$$

式中, d/dt 表示对时间的微分; y 表示被控对象的输出(控制量); u 为被控对象的输入(操作量),它是时间的函数; $a_i(i=1,2,\cdots,n)$ 和 $b_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为常数。

4.2.2 数学模型

了解被控对象特性的一种简单方法就是对被控对象施加某种测试信号,然后观察其响应。以下是两个例子。

【举例:医生】

医生常常扣击患者的胸部,并用听诊器倾听。

【举例:机械检查】

利用锤击检查是否存在机械断裂,即用锤子敲打机械,同时倾听其声音。

这两个例子都是以“敲打”作为输入,并通过观测其响应(敲打时的声音或振动)来了解对象的特性。该方法在控制工程中也同样可行。了解被控对象特性的基本方法之一就是对其施加脉冲输入(impulse input)

$$u(t) = \delta(t) = \begin{cases} 0 & (t \neq 0) \\ \infty & (t = 0) \end{cases} \quad (4.2)$$

即在时刻 $t=0$ 通过瞬间给定一个很大的输入(即“敲击”)(图 4.7),以激发出被控对象的内在特性。将对应于时刻 $t<0$ 时输出为 0 的被控对象的脉冲输入的响应称为脉冲响应 (impulse response), 用下式表示:

$$y(t) = g(t) \quad (4.3)$$

该响应是被控对象固有的性质,因而具有重要意义。知道了该函数(若被控对象为线性的),则对于任意输入,其响应均可由下式求出:

$$y(t) = \int_0^t g(t-s) u(s) ds \quad (4.4)$$

该式称为卷积积分(convolution integral)。上式中的 $g(t)$ 为输入函数的权重,因此脉冲响应 $g(t)$ 又称为权函数(weighting function)。

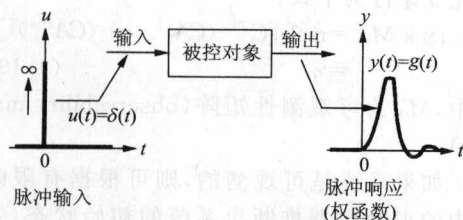


图 4.7 脉冲响应

利用权函数可以对被控对象的稳定性定义如下:

稳定性的定义:若权函数 $g(t)$ 随时间变化逐渐趋于某一定值,则称被控对象是稳定(stable)的。反之,若随时间变化而发散,称系统是不稳定的(unstable)。

以上研究了权函数 $g(t)$ 。不过,这种表达方式在控制规则设计时不便于应用,因此一般都对其进行变换后再应用。为此,首先引入了与式(4.1)等价但更便于分析的状态方程。然后从输入输出关系的观点出发定义传递函数。进而,在被控对象稳定的前提下,引入更加直观和易于理解的频域传递函数。上述三者均为系统的数学模型,且各自具有响应的控制规则设计方法。

1. 状态方程

系统(式(4.1))中,设 $d/dt = p$,

$$\left. \begin{aligned} D(p) &= p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \cdots + a_1p + a_0 \\ N(p) &= b_{n-1}p^{n-1} + b_{n-2}p^{n-2} + \cdots + b_1p + b_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

则式(4.1)可写成

$$D(p)y = N(p)u \quad (4.6)$$

为便于分析,引入新变量 v ,并将上式分割为如下的两个式子:

$$D(p)v = u \quad (4.7)$$

$$y = N(p)v \quad (4.8)$$

若 n 维向量 x 定义为

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ &= [v, pv, \dots, p^{n-1}v]^T \end{aligned} \quad (4.9)$$

则式(4.7)可以写成

$$p^n v = -a_0 v - a_1 pv - \cdots - a_{n-1} p^{n-1} v + u \quad (4.10)$$

利用式(4.9),得

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pv \\ p^2 v \\ \vdots \\ p^n v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ -a_0 v - a_1 pv - \cdots - a_{n-1} p^{n-1} v + u \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.11)$$

于是式(4.8)可写成

$$\begin{aligned} y &= b_0 v + b_1 pv + \cdots + b_{n-1} p^{n-1} v \\ &= b_0 x_1 + b_1 x_2 + \cdots + b_{n-1} x_n \end{aligned} \quad (4.12)$$

至此,得到了系统(式(4.1))的另外一种表达方式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \quad (A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times 1}) \\ y &= Cx \quad (C \in R^{1 \times n}) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdots & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$C = [b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_n] \quad (4.14)$$

式(4.13)称为系统(式(4.1))的状态方程(state equation)表达形式,向量 x 称为状态变量(state variable)。如果把状态变量看作表示系统内部状况的信息(与此对应,输入 u 和输出 y 为外部信息),状态方程可解释如下。

[解释] 将操作量 u 施加于系统时,其影响将储存在状态 x 中。在控制量 y 中,这些状态以某种组合的方式出现。

这里给出的是变换方法的一种,但并不是唯一的。由后面的介绍我们可以知道,一般情况下,矩阵 A, B, C, D 并不一定具有式(4.14)那样的构造,而且输出 y 和输入 u 也不一定都是标量数值。在这种情况下, B, C 具有矩阵的形式。

下面介绍几个状态方程的性质(参阅文献[3])。

1) 状态方程的解

用状态方程式描述系统时,可求出其微分方程的解析解为

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= e^{At}x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

其中,

$$\begin{aligned} e^{At} &= I + At + \frac{1}{2!}A^2t^2 + \dots \\ &+ \frac{1}{k!}A^kt^k + \dots \end{aligned} \quad (4.16)$$

(将式(4.15)代入式(4.13)即可验证)。

2) 权函数

求出状态方程式的解后,即可据此计算权函数。将输入(式(4.2))代入式(4.15)即可如下求出:

$$g(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ Ce^{At}B & (t \geq 0) \end{cases} \quad (4.17)$$

3) 可控性

根据状态方程的上述解释,自然就产生这样一个问题,即对于输入 u ,是否任意位置都具有状态 x 。下面给出有关这个问题的解答。

可控性的定义: 对于初始状态为 $x(0)$ 的任意系统(式(4.13)),若在有限时间 $t \in (0, t_e)$ 内,对于输入 $u(t)$,有 $x(t_e) = 0$,则称该系统是可控的(controllable)。

可控性条件: 系统(式(4.13))可控的充要条件为下式:

$$\text{rank } M_c = \text{rank} [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] = n \quad (4.18)$$

式中, M_c 为可控性矩阵(controllability matrix)。

如果系统是可控的,则对于有限时间内的输入,从任意初始状态到任意目标状态都是可移动的。这里需要注意的是,此处要求的是“通过”而不是“停留”在目标状态。

4) 可观性

能否通过对系统外部数据的观测得到系统内部状态 x 的信息也是基本问题之一。该问题可如下求解。

可观性的定义: 若系统(式(4.13))具有任意的初始状态 $x(0)$,且仅根据其零输入响应(操作量恒为0时,有限时间 $t \in (0, t_e)$ 内的控制量 $y(t)$)就能获得初始状态 $x(0)$,则称系统为可观的(observable)。

可观性条件: 系统(式(4.13))可观的充要条件为下式:

$$\begin{aligned} \text{rank } M_o &= \text{rank} [C^T \quad (CA)^T \quad \dots \quad (CA^{n-1})^T]^T \\ &= n \end{aligned} \quad (4.19)$$

式中, M_o 为可观性矩阵(observability matrix)。

如果系统是可观的,则可根据有限时间内的观测数据推断出系统的初始状态,并由式(4.15)计算出任意时刻的状态。

5) 等价变换

如前所述,矩阵 A, B, C (式(4.14))的结构并不是唯一的。对此可通过如下方法加以检验。设采用任意的正则矩阵 T 进行坐标变换,即

$$z = Tx \quad (4.20)$$

如果将系统(式(4.13))用新坐标 z 来表示,则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= (TAT^{-1})z + TBu \\ y &= (CT^{-1})z \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

该式与原系统(式(4.13))具有相同的形式,且系统的解可由式(4.15)、式(4.20)求解得到下式:

$$\begin{aligned} y_z(t) &= (CT^{-1})e^{(TAT^{-1})t}z(0) \\ &+ \int_0^t (CT^{-1})e^{(TAT^{-1})(t-\tau)}TBu(\tau)d\tau \\ &= CT^{-1}Te^{At}T^{-1}z(0) \\ &+ \int_0^t CT^{-1}Te^{A(T-\tau)}T^{-1}TBu(\tau)d\tau \\ &= Cx(0) + \int_0^t e^{A(T-\tau)}Bu(\tau)d\tau \\ &= y(t) \end{aligned} \quad (4.22)$$

该式表明坐标变换前后输出与输入的关系是

不变的。从这个意义上说,这种坐标变换称为等价变换(equivalence transformation)。

根据等价变换,可得状态方程的几个标准型。

可控伴随标准型:若一般系统(式(4.13))是可控的,则可由坐标变换 $z = T_c x$ 变换如下:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= A_c z + B_c u \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdots & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} z \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y &= C_c z = [b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_n] z \end{aligned} \quad (4.23)$$

这称为可控伴随标准型系统(controllable companion form)。其中,坐标变换矩阵 T 由可控性矩阵的逆阵 M_c^{-1} 第 n 行的向量 l^T 构成,即

$$T = \begin{bmatrix} l^T \\ l^T A \\ \vdots \\ l^T A^{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

可观伴随标准型:如果一般的系统(式(4.13))是可观的,则可由坐标变换 $z = T_o x$ 变换如下:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= A_o z + B_o u \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} u \\ y &= C_o z = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1] z \end{aligned} \quad (4.25)$$

系统(式(4.23))与系统(式(4.25))是等价的。这称为可观伴随标准型系统(observable companion form)。

对于上述两个伴随标准型,有下式成立:

$$\begin{aligned} \det[sI - A] &= \det[sI - A_c] = \det[sI - A_o] \\ &= s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0 \end{aligned} \quad (4.26)$$

2. 传递函数

下面对描述系统输入、输出关系的表达式加以研究。

1) 传递函数的定义

设系统(式(4.1))的初始状态全部为0,对两边进行拉普拉斯变换,得

$$\begin{aligned} (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0)y(s) \\ = (b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_1s + b_0)u(s) \end{aligned} \quad (4.27)$$

式中, $y(s) = \mathcal{L}[y(t)]$ 、 $u(s) = \mathcal{L}[u(t)]$ 中的 $\mathcal{L}[\cdot]$ 表示拉普拉斯变换; $s = (\sigma + j\omega)$ 为复数。本式可改写为

$$\begin{aligned} y(s) &= \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0} u(s) \\ &= G(s) u(s) \end{aligned} \quad (4.28)$$

即输出 $y(s)$ 等于输入 $u(s)$ 的 $G(s)$ 倍。下式

$$G(s) = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \cdots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0} \quad (4.29)$$

为描述被控对象信号传递的函数,定义为传递函数(transfer function)。由拉普拉斯变换式可知

$$y(s) = \mathcal{L}[g(t)]u(s) \quad (4.30)$$

由式(4.28)、式(4.30)可知,传递函数又是权函数的拉普拉斯变换,即

$$G(s) = \mathcal{L}[g(t)] \quad (4.31)$$

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1}[G(s)] \quad (4.32)$$

式中, $\mathcal{L}^{-1}[\cdot]$ 为拉普拉斯逆变换。若能够得到状态方程(4.13),通过对两边进行拉氏变换并求得输入输出之间的关系,即可按下式计算传递函数:

$$G(s) = C(sI - A^{-1})B \quad (4.33)$$

2) 传递函数的优点

用传递函数来描述系统,可以很容易地表达多个系统的组合。

例如,传递函数分别由 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 两个系统串连在一起时(图4.8(a)左侧),描述整个系统输入输出关系的传递函数 $G(s)$ 可以用如下的代数运算求出:

$$G(s) = G_2(s)G_1(s) \quad (4.34)$$

两系统并联时(图4.8(b)),描述整个系统输入输出关系的传递函数可通过简单的加法运算求出,即

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) \quad (4.35)$$

简化运算正是传递函数的最大优点。

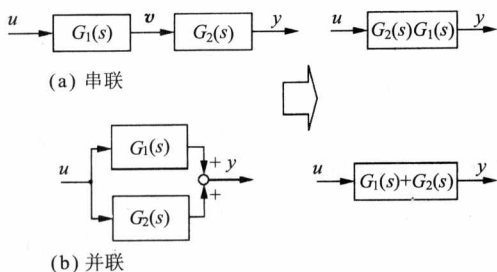


图 4.8 系统组合

3. 频域传递函数

如果被控对象是稳定的,可以采用与实验密切相关且物理意义更加明确的表达方法——频域传递函数。同时,可以用定义它的图示方法——波特图和根轨迹^[2]。

1) 频域传递函数的定义

定义基于以下两个性质:① 若被控对象是稳定的,则对于有界输入,输出也是有界的;② 许多信号(包括 δ 函数在内)可以表示为多个三角函数的组合(或积分)(傅里叶级数展开、傅里叶变换等)。

例如, δ 函数(脉冲输入)可以用余弦波的叠加表示如下:

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \cos \omega t d\omega \quad (4.36)$$

若

$$u(t) = \cos \omega t \quad (4.37)$$

的响应已知,则利用该性质和叠加原理即可得到脉冲响应。

对于一个稳定的线性系统(式(4.1)),如果持续输入余弦波(式(4.37)),则其稳态响应也是角频率为 ω 的余弦波(通过简单的试验即可验证)。其中,振幅与相位随 ω 的变化而变化,且振幅为输入的 $A(\omega)$ 倍,相位差为 $\theta(\omega)$,即

$$y(t) = A(\omega) \cos(\omega t + \theta(\omega)) \quad (4.38)$$

式中, $A(\omega)$ 为增益特性(gain characteristic); $\theta(\omega)$ 为相位特性(phase characteristic)。当 $\theta(\omega) > 0$ 时称为相位超前(phase lead), $\theta(\omega) < 0$ 时称为相位滞后(phase lag)。如果将增益特性看作“长度”,相位特性看作“偏角”,则两个函数可以用一个复数来表示,即

$$G(j\omega) = A(\omega) e^{j\theta(\omega)} \quad (4.39)$$

式中,函数 $G(j\omega)$ 表示输入余弦信号(角频率

为 ω)的传递程度。从这个意义上, $G(j\omega)$ 称为频域传递函数(frequency transfer function)。

式(4.38)是式(4.37)的响应。由于脉冲输入可以写成式(4.36)的形式,根据叠加原理,权函数 $g(t)$ 可用下式计算:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) \cos(\omega t + \theta(\omega)) d\omega \quad (4.40)$$

应用欧拉公式,可以将上式变形为

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.41)$$

即频域传递函数 $G(j\omega)$ 为权函数 $g(t)$ 的傅里叶变换。于是得下式:

$$\begin{aligned} g(t) &= \mathcal{L}^{-1}[G(j\omega)] \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$G(j\omega) = \mathcal{L}[g(t)] = \int_0^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.43)$$

式中, $\mathcal{L}[\cdot]$ 表示傅里叶变换*。若已知微分方程(4.1)和状态方程(4.13),则 $G(j\omega)$ 可计算如下:

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + b_{n-2}(j\omega)^{n-2} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \\ &= C(j\omega I - A)^{-1} B \end{aligned} \quad (4.44)$$

2) 伯德图

频域传递函数由增益特性和相位特性决定,且二者均是频率的函数。若将增益特性和相位特性用图来表示,便可把握系统的整体特性。伯德图(Bode diagram)即为图示方法的一种。波特图由表示增益特性的增益图和表示相位特性的相位图构成。其中,增益图(gain diagram)的横坐标为角频率(对数刻度(rad/s)),纵坐标为增益($20 \lg |A(\omega)|$ (dB) (分贝))。相位图(phase diagram)的横坐标为角频率(对数刻度(rad/s)),纵坐标为角度(deg)。图 4.9 为根据弹簧-质量-阻尼系统(输入为弹簧压力,输出为弹簧位移)的频域传递函数画出的波特图。图 4.9(a)为增益图,图 4.9(b)为相位图。

* 式(4.43)中,积分区间从 0 开始,这是因为 $g(t)$ 在时间为 0 时取值为 0。该式可计算的条件是时间为 0, $g(t)$ 也必须收敛到 0,即被控对象必须是一个稳定系统。

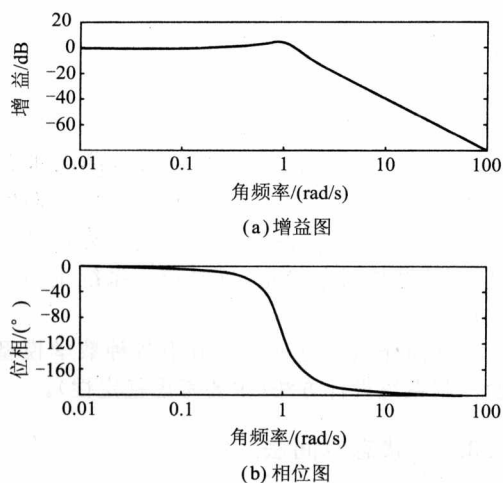


图 4.9 波特图

由图 4.9 可以看出,该系统对于 0.1rad/s 左右的输入将产生跟随运动(增益约为 1,相位约为 0)。当输入信号的频率在 100rad/s 附近时,则基本上没有输出(增益非常小)。此外,在 1rad/s 处增益为正值,这表明对于该频率的输入信号,输出波形的振幅将大于输入波形,此时的角频率称为共振角频率(resonant frequency)。

3) 根轨迹

式(4.39)的频域传递函数 $G(j\omega)$ 表示的是一个长度 $A(\omega)$ 、偏角 $\theta(\omega)$ 的复数。当角频率 ω 确定后, $G(j\omega)$ 即为复平面上的一个点。使 ω 从 0 变化到 ∞ , 点 $G(j\omega)$ 将形成一条连续变化的线图,称之为根轨迹(vector locus)。图 4.9 所示系统的根轨迹如图 4.10 所示。

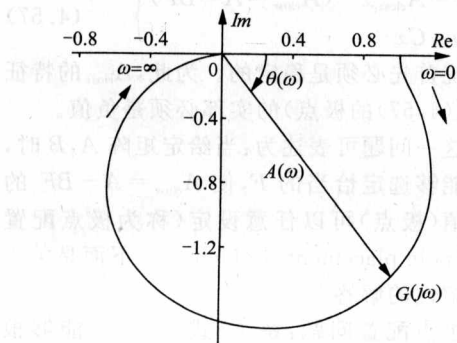


图 4.10 根轨迹

在波特图中,角频率的变化范围受到一定的限制。根轨迹则能够给出全部角频率的

增益和相位,不过它的缺点是某些角频率的增益大小和偏角不确定。

4.2.3 稳定性

4.2.1 节中利用权函数对给定被控对象的稳定性进行了定义。实际上,每一种数学模型也都有其对应的稳定性定义。

1. 状态方程(稳定性定义)

对于给定的状态方程(4.13),其权函数如式(4.17)所示。设状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y &= Cx = [1 \quad 0]x \end{aligned} \quad (4.45)$$

(或经过必要的坐标变换后成为此形式)。这里, λ_1, λ_2 为实数,是矩阵 A 的特征值(eigen value)。

特征值法: 上述系统的权函数为

$$\begin{aligned} g(t) &= [1 \quad 0] e^{\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= e^{\lambda_1 t} + e^{\lambda_2 t} \quad (t \geq 0) \end{aligned} \quad (4.46)$$

若 $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$, 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0 \quad (4.47)$$

此时,可以说系统是稳定的。

根据以上分析可作如下推测,即系统的稳定性与状态方程中 A 矩阵的特征值有关。实际上,存在以下的稳定性条件:

稳定性条件(依据状态方程): 状态方程(4.13)稳定的充要条件是 A 矩阵特征值的实部全为负值。

2. 传递函数(稳定性定义)

首先定义传递函数的极点和零点。由前述的定义可知,传递函数是复数 s 的有理函数。对分子分母进行因式分解,传递函数可写成

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{n(s)}{d(s)} \\ &= \frac{b_{n-1}(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_{n-1})}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \end{aligned} \quad (4.48)$$

式中, $G(z)=0$ 的点 $s=z$ 称为传递函数 $G(s)$ 的零点(zero); $G(p)=\infty$ 的点 $s=p$ 称为极点(pole)。分母的阶次与分子的阶次之差 $q=n-m$ 称为相对阶次(relative degree)。

为简单起见,设极点全部是实数且互不相等,则上式可写成

$$G(s) = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \cdots + \frac{A_n}{s-p_n} \quad (4.49)$$

由式(4.32),有

$$\begin{aligned} g(t) &= \mathcal{L}^{-1}[G(s)] \\ &= \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{A_1}{s-p_1}\right] + \cdots + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{A_n}{s-p_n}\right] \\ &= A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \cdots + A_n e^{p_n t} \end{aligned} \quad (4.50)$$

若 $p_i < 0$ ($i=1, 2, \dots, n$), 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0 \quad (4.51)$$

将该结果扩展到一般情形,则有

稳定性条件(依据传递函数): 传递函数(式(4.48))稳定的充要条件为特征方程(characteristic equation)

$$d(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0 = 0 \quad (4.52)$$

的所有根(极点)的实部为负值。

极点实部为负值(非负)时,称为稳定极点(stable pole)(不稳定极点(unstable pole)); 零点实部为负值(非负)时,称为稳定零点(stable zero)(不稳定零点(unstable zero))。

4.2.4 考察

如上所述,被控对象(系统)具有多种形式的数学模型。但这些数学模型之间并不相互独立,而是可以相互变换的,可根据研究对象的具体情况选择合适的数学模型。

由式(4.33)和式(4.48),有

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{n(s)}{d(s)} = C(sI - A)^{-1}B \\ &= \frac{\text{Cadj}(sI - A)B}{\det(sI - A)} \end{aligned} \quad (4.53)$$

故特征方程存在如下关系:

$$d(s) = \det(sI - A) \quad (4.54)$$

即传递函数的极点就是状态方程中 A 矩阵的特征值。因此,在进行系统稳定性判定时,只要求出特征方程的根就可以了。只是这时需要求解 n 次方程,而一般情况下高次方程的解析解是不容易求出的。

为此提出了不用求解特征方程,仅依靠系数信息来判断稳定性的方法。此即 1877 年发表的劳思(E. J. Routh)法和 1895 年发表的赫尔维茨(A. Hurwitz)法。两种方法是各

自独立发表的。尽管它们的步骤不同但是相互等价的。详情参阅文献[3]。

4.3 反馈控制系统设计

所谓控制系统设计,就是针对给定被控对象设计控制器(即控制规则),并建立如图 4.5 所示的反馈控制系统。这里需要注意的是,即使被控对象稳定,反馈控制系统也不一定稳定。

下面介绍对应于 4.2 节中各种数学模型的控制系统设计方法(主要考虑稳定性)。

4.3.1 状态空间法

设作为数学模型而给定的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & (A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times 1}) \\ y = Cx & (C \in R^{1 \times n}) \end{cases} \quad (4.55)$$

下面研究其控制器的设计方法

1. 状态反馈

如果状态 x 可以直接可观测,则可采用如下状态反馈控制规则(state feedback control law):

$$u = -Fx \quad (4.56)$$

式中, F 为设计参数(在后面确定)。对于一个初始状态为非零的系统,使其状态全部成为零时,称为调节器问题(regulator problem)(或者说其目标值为 0)。

将式(4.56)代入式(4.55),即可得到如下反馈控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{\text{close}}x & (A_{\text{close}} = A - BF) \\ y = Cx \end{cases} \quad (4.57)$$

该系统首先必须是稳定的。为此, A_{close} 的特征值(式(4.57)的极点)的实部必须是负值。

这一问题可表述为:当给定矩阵 A, B 时,是否能够选定恰当的 F ,使 $A_{\text{close}} = A - BF$ 的特征值(极点)可以任意设定(称为极点配置问题(pole placement problem))。下面是关于其可解性的解答^[4]。

极点配置问题: 系统(式(4.55))能够根据状态反馈(式(4.56))任意配置极点(即调节器问题可解)的充要条件是系统(式(4.55))可控。此时的控制系统如图 4.11 所示。

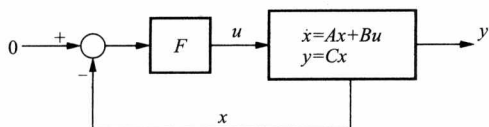


图 4.11 状态反馈控制系统

2. 观测器法

若状态 x 不可观测,则无法应用状态反馈控制。为此,人们考虑采用某种方法对状态进行估计,并将估计值 z 作为反馈信号的方法,即

$$u = -Fz \quad (4.58)$$

下面对观测器法(observer),即根据输入 u 和输出 y 进行状态估计的方法作一些介绍。

观测器法的思想方法是,首先假设有一个仿真器,它与原系统具有相同的动力学特性。如果能使该仿真器的初始状态与原系统的初始状态相同,则两者在任意时刻的状态都应该相同。但是,由于系统状态是不可观测的,因此也就难以保证两者的初始状态相同。不过,通过在仿真器中增加一个反映可观测输出量与输出估计值之间偏差的修正项,可使二者之间的动作逐渐接近,即有可能使仿真器的状态与原系统状态一致。

以下举一个观测器组成的例子。

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= Az + Bu - K(\hat{y} - y) \\ \hat{y} &= Cz \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

式中, z 为状态的估计值; K 为观测器增益(observer gain)。状态估计误差 $e = x - z$ 为如下自由系统的解:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{z} - \dot{x} = Az + Bu - K(\hat{y} - y) - Ax - Bu \\ &= Ae - K(\hat{y} - y) = Ae - KC(z - x) \\ &= (A - KC)e \end{aligned} \quad (4.60)$$

这里需要求解的是矩阵 $A - KC$ 的特征值。由此可知下面的结果。

观测器法:系统(式(4.59))是系统(式(4.55))的观测器。即矩阵 $A - KC$ 的特征值(观测器的极点)能够任意配置的充要条件是系统(式(4.55))可观测。

基于观测器法的极点配置问题:对于系统(式(4.55)),仅利用输入输出信号即可建立控制规则(式(4.58)、式(4.59)),且反馈系统所有极点可以任意配置(即调节器问题可解)的充要条件是“系统(式(4.55))可控且可观测”。由此得到的控制系统结构如图 4.12 所示。

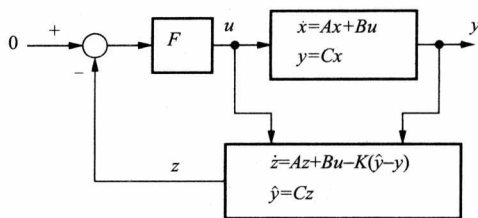


图 4.12 观测器+状态反馈控制

上面有关观测器构成法的介绍仅涉及最基本的方法。更加一般化的方法参阅文献[5]等。

3. 反馈控制系统的设计

如前所述,若给定被控对象可控且可观测,则:①可以设计出基于观测器和估计状态的状态反馈控制规则;②系统内的极点可以任意配置。下面介绍具体方法^[3,4]。

首先,根据状态反馈对极点配置如下:

$$P_F = \{-\lambda_1, -\lambda_2, \dots, -\lambda_n\} \quad (\lambda_i > 0 : i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.61)$$

而观测器极点的配置为

$$P_O = \{-\mu_1, -\mu_2, \dots, -\mu_n\} \quad (\mu_i > 0 : i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.62)$$

这时,可得如下结果。

反馈控制器的设计:图 4.12 的控制器可按以下步骤进行设计:

步骤 1 由目标极点所得到的特性方程式,可根据 F 并按照下式进行计算:

$$\begin{aligned} d_r(s) &= (s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \cdots (s + \lambda_n) \\ &= s^n + \hat{a}_{n-1}s^{n-1} + \cdots + \hat{a}_1s + \hat{a}_0 \end{aligned} \quad (4.63)$$

步骤 2 增益 F 采用下式进行计算:

$$\begin{aligned} F &= [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}] \\ &= [\hat{a}_0 - a_0, \hat{a}_1 - a_1, \dots, \hat{a}_{n-1} - a_{n-1}] \end{aligned} \quad (4.64)$$

步骤 3 由目标观测器极点得到的观测器特性方程式,可根据 K 计算如下:

$$\begin{aligned} d_o(s) &= (s + \mu_1)(s + \mu_2) \cdots (s + \mu_n) \\ &= s^n + \hat{h}_{n-1}s^{n-1} + \cdots + \hat{h}_1s + \hat{h}_0 \end{aligned} \quad (4.65)$$

步骤 4 由下式计算增益 K :

$$\begin{aligned} K &= [k_0, k_1, \dots, k_{n-1}] \\ &= [\hat{h}_0 - a_0, \hat{h}_1 - a_1, \dots, \hat{h}_{n-1} - a_{n-1}] \end{aligned} \quad (4.66)$$

步骤 5 根据被控对象的 A, B, C 矩阵和已求得的增益 F, K ,即可得图 4.12 所示控制系统。

以上研究是关于反馈控制系统稳定性方面的,至于其他方面,可以通过极点配置来考虑。

4.3.2 传递函数法

设给定的传递函数数学模型为

$$G(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{b_{n-1}(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_{n-1})}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \quad (4.67)$$

下面研究其控制器的设计方法。

1. 既约分解

传递函数是关于 s 的既约多项式之比。下面把它从形式上进行展开用传递函数之比来表示,即具有共同分母的有理函数之比^[6]:

$$G(s) = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.68)$$

式中, $N(s), D(s)$ 均为关于 s 的有理函数(传递函数),它们可以利用与 $d(s)$ 具有相同阶次 n 的任意稳定多项式 $\alpha(s)$ ($\alpha(s)=0$ 所有根实部均为负值)和原传递函数的分子 $n(s)$ 、分母 $d(s)$, 定义如下(均为稳定传递函数):

$$N(s) = \frac{n(s)}{\alpha(s)}, \quad D(s) = \frac{d(s)}{\alpha(s)} \quad (4.69)$$

这种用稳定传递函数之比表示传递函数的方法称为稳定有理函数上的既约分解表示法(coprime factorization)。对于传递函数 $G(s)$, 单元(unit)定义为

$$U = \{\text{单元}\}$$

$$= \{G(s) | \text{稳定且 } 1/G(s) \text{ 也稳定}\}$$

即所谓单元是指仅有稳定零点、稳定极点且相对阶次为 0 的传递函数。该表示法的优点在于传递函数之间的运算为代数运算。

2. 反馈控制系统的内部稳定性

被控对象本身的稳定性分析已经在 4.2.2 节中进行了定义。下面对图 4.13 所示反馈控制系统的稳定性进行定义。该图中的 $G(s)$ 为被控对象、 $C(s)$ 为控制器、 d 为扰动。

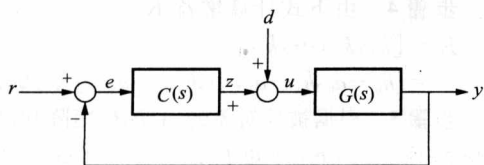


图 4.13 反馈控制系统

该反馈控制系统中,从外部信号 r, d 到各要素的输出 z, y 之间的传递函数为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{yr}(s) & G_{yd}(s) \\ G_{zr}(s) & G_{zd}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ d \end{bmatrix} \\ &= G_{\text{closed}}(s) \begin{bmatrix} r \\ d \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} & \frac{G(s)}{1+G(s)C(s)} \\ \frac{C(s)}{1+G(s)C(s)} & -\frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ d \end{bmatrix} \quad (4.70) \end{aligned}$$

此时有如下定义。

反馈控制系统的内部稳定性 当式(4.70)中的四个传递函数均稳定时,称反馈控制系统(图 4.13)为内部稳定。

起初一看来,好像只要考虑从 r 到 y 的传递函数 $G_{yr}(s)$ 的稳定性就可以保证系统的内部稳定。但是,由于有可能发生被控对象与控制器之间不稳定零点/极点相互抵消的情况,因而上定义是必要的。若没有零点/极点相互抵消现象,则只考虑 $G_{yr}(s)$ 的稳定性就够了。

控制系统设计的第一步就是选择稳定的 $C(s)$ 。但 $C(s)$ 并不是唯一的。下面,对于给定的被控对象 $G(s)$,我们来求使图 4.13 所示反馈控制系统稳定的所有控制器 $C(s)$ 。

首先,将稳定的 $C(s)$ 写成如下的既约分解有理函数形式:

$$C(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)} \quad (4.71)$$

将该式与式(4.68)代入式(4.70),得

$$\begin{aligned} G_{\text{closed}}(s) &= \frac{1}{\phi(s)} \\ &\cdot \begin{bmatrix} N_c(s)N(s) & D_c(s)N(s) \\ N_c(s)D(s) & N_c(s)N(s) \end{bmatrix} \quad (4.72) \end{aligned}$$

其中,

$$\phi(s) = D(s)D_c(s) + N(s)N_c(s) \quad (4.73)$$

将上述反馈控制系统内部稳定性的定义与式(4.70)、式(4.72)进行比较,并考虑 $D(s), N(s), D_c(s), N_c(s)$ 均为稳定传递函数,可得图 4.13 所示反馈控制系统内部稳定的充要条件为: $\phi(s)^{-1}$ 稳定,或利用单元 $U(s)$,

改写成如下形式:

$$U(s) = D(s) D_c(s) + N(s) N_c(s) \quad (4.74)$$

该式与上述充要条件等价。由于上式两边除以 $U(s)$ 后条件保持改变 ($U(s)$ 为单元), 故有如下结论。

内部稳定性条件: 反馈控制系统 (图 4.13) 内部稳定的充要条件为

$$1 = D(s) D_c(s) + N(s) N_c(s) \quad (4.75)$$

该式称为 Bezout 等式 (Bezout identity)。

3. 稳定补偿器的参数化

上述稳定条件表明, 对于给定被控对象 $N(s), D(s)$, 通过求解 Bezout 等式得到 $N_c(s)$ 和 $D_c(s)$, 并据此构成控制器 $C(s) = N_c(s)/D_c(s)$, 则反馈控制系统内部稳定。Bezout 等式有无数个解, 其一般解可以利用一组特解 $X(s), Y(s)$ (稳定且满足式 (4.75) 的传递函数) 和任意的稳定传递函数 $Q(s)$ 写成如下形式:

$$\left. \begin{aligned} N_c(s) &= X(s) + Q(s) D(s) \\ D_c(s) &= Y(s) - Q(s) N(s) \end{aligned} \right\} \quad (4.76)$$

由此可得以下结果。

欧拉参数化: 使反馈控制系统内部稳定的所有控制器可由下式给出^[6]:

$$C(s) = \frac{X(s) + Q(s) D(s)}{Y(s) - Q(s) N(s)} \quad (4.77)$$

【例题】 设给定被控对象为

$$G(s) = \frac{1}{s+2} \quad (4.78)$$

对于图 4.13 的反馈控制系统, 试求使系统内部稳定的控制器 $C(s)$ 。

设 $G(s)$ 为稳定的有理函数, 既约分解后, 成为

$$N(s) = \frac{1}{s+2}, \quad D(s) = 1 \quad (4.79)$$

于是可得 Bezout 等式的一组特解, 如 $X(s) = 0, Y(s) = 1$ 。因此故所求全部稳定控制器为

$$\begin{aligned} C(s) &= \frac{Q(s)}{1 - Q(s) + \left(\frac{1}{s+2}\right)} \\ &= \frac{(s+2)Q(s)}{s+2 - Q(s)} \end{aligned} \quad (4.80)$$

式中, $Q(s)$ 为任意的稳定传递函数。

通过恰当选择自由参数 $Q(s)$, 可满足反馈控制系统设计的其他要求 (参阅文献 [6])。

4.3.3 频域传递函数

最后介绍对于一个稳定的被控对象, 如果它的数学模型已由波特图形式给出, 如何构造反馈控制系统的方法。

1. 反馈控制系统的稳定性

若被控对象 $G(s)$ 和控制器 $C(s)$ 稳定, 则其串联后仍然稳定。但若构成反馈控制系统, 则在某些情况下是不稳定的。

为此我们来研究仅知道 $G(s)$ 的频域传递函数 $G(j\omega)$ 或波特图 (由实验得到) 时如何确立稳定条件。具体来说, 就是构成闭环之前的系统 (图 4.14 中虚线内的系统), 其频域传递函数 (开环频域传递函数 (open loop frequency transfer function)) 的波特图满足什么条件, 构成闭环的反馈系统时才是稳定的。

$$G_{\text{open}}(j\omega) = G(j\omega) C(j\omega) \quad (4.81)$$

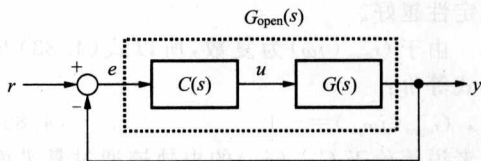


图 4.14 反馈控制系统

稳定性条件 (波特图): 图 4.14 所示反馈控制系统的稳定性可以用开环频域传递函数 $G_{\text{open}}(j\omega)$ 的波特图, 按照如下方法进行判定:

① 相位差为 -180° 时的角频率 ω_{ph} (相位交点 (phase crossover)) 处的增益小于 0dB, 即

$$\left. \begin{aligned} \angle G_{\text{open}}(j\omega_{ph}) &= -180^\circ \\ 20\lg|G_{\text{open}}(j\omega_{ph})| &< 0\text{dB} \end{aligned} \right\} \quad (4.82)$$

时, 反馈控制系统稳定。

② 相位差为 -180° 时的角频率 ω_{ph} 处的增益刚好等于 0dB, 即

$$\left. \begin{aligned} \angle G_{\text{open}}(j\omega_{ph}) &= -180^\circ \\ 20\lg|G_{\text{open}}(j\omega_{ph})| &= 0\text{dB} \end{aligned} \right\} \quad (4.83)$$

时, 反馈控制系统为临界稳定。

③ 相位差为 -180° 的角频率 ω_{ph} 处的增益大于 0dB, 即

$$\left. \begin{aligned} \angle G_{\text{open}}(j\omega_{ph}) &= -180^\circ \\ 20\lg|G_{\text{open}}(j\omega_{ph})| &> 0\text{dB} \end{aligned} \right\} \quad (4.84)$$

时, 反馈控制系统不稳定。

图 4.15 给出了上述三种情况的示意图。

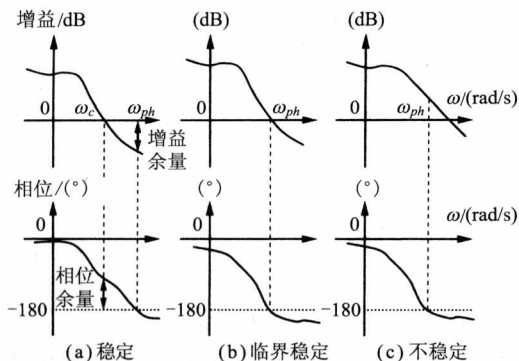


图 4.15 反馈控制系统的稳定性判定

图 4.15(a)中,增益为 0dB 时的角频率 ω_c (穿越增益 (gain crossover)) 处的相位与 -180° 的差值称为相位余量 (phase margin)。相位为 -180° 时的角频率 ω_{ph} 处的增益值 $|20 \lg |G_{open}(j\omega_{ph})||$ dB 称为增益余量 (gain margin)。两者的数值越大,反馈控制系统的稳定性越好。

由于 $G_{open}(j\omega)$ 为复数,所以式 (4.83) 与下式等价:

$$G_{open}(j\omega_{ph}) = -1 \quad (4.85)$$

或者说等价于 $G_{open}(j\omega)$ 的根轨迹通过复平面上的点 $(-1, 0j)$ 。由此可得基于根轨迹的稳定性判据,该方法与基于波特图的稳定性判据等价。此即所谓的(狭义)奈奎斯特稳定性判定法(Nyquist stability criterion)。

稳定性条件(狭义奈奎斯特法) 图 4.14 的反馈控制系统的稳定性可以利用开环频域传递函数 $G_{open}(j\omega)$ 的根轨迹判断如下:

① $G_{open}(j\omega)$ 的根轨迹总在点 $(-1, 0j)$ 的右侧时,反馈控制系统稳定。

② $G_{open}(j\omega)$ 的根轨迹通过点 $(-1, 0j)$ 时,反馈控制系统处于临界稳定状态。

③ $G_{open}(j\omega)$ 的根轨迹总在点 $(-1, 0j)$ 的左侧时,反馈控制系统不稳定

图 4.16 为上述三种情况的示意图。增益余量和相位余量在根轨迹上的表示如图 4.16(a)所示。

狭义奈奎斯特法只适用于开环系统稳定的情况,而一般奈奎斯特法则可用于开环系统不稳定的场合。详细内容参阅文献[3], [7]。

2. 反馈控制系统的设计

由稳定的被控对象与稳定的控制器串联

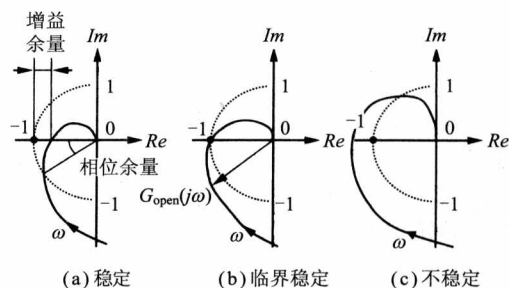
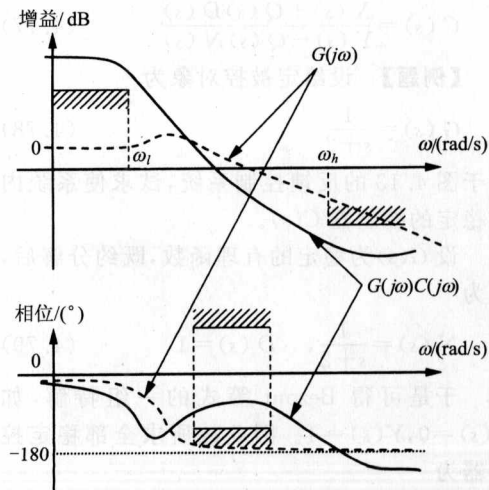


图 4.16 奈奎斯特稳定性判定法

起来组成反馈控制系统时(图 4.14),为保证系统稳定,开环频域传递函数必须满足图 4.14(a)。特别是波特图在 ω_c 、 ω_{ph} 等中间频率范围内的形状非常重要。我们知道,为了提高目标的追踪性能和抗干扰能力,增益越大越好。但另一方面,为了使反馈控制系统在波特图存在误差时不失去稳定性(鲁棒稳定性(robust stability)),增益越小越好。

在综合考虑系统稳定性、目标追踪性和鲁棒稳定性的基础上,可描绘出开环频域传递函数所期望的大致形状,如图 4.17 所示,于是总结控制规则的设计步骤如下:

图 4.17 开环频域传递函数 $G(j\omega)C(j\omega)$ 所期望的波特图

反馈控制器的设计:

步骤 1 获得被控对象的波特图(图 4.17 中的虚线图)。

步骤 2 根据控制目标,确定期望开环波特图的大致形状(图 4.17 中的实线图)。

步骤3 以消除步骤1和步骤2中波特图之间的偏差(图4.17中虚线图和实线图的差值)为目标,求出控制规则。

在本节所介绍的古典控制理论中,可以借助几个能设定参数的稳定基本环节,将它们串联起来求解步骤3。至于稳定环节串联后的波特图,借助图解法将各个增益图或相位图几何相加即可得到^[2]。

4.4 控制理论简介

在上述基本控制方法的基础上,本节简单地介绍几种控制理论。

4.4.1 最优控制(LQ控制, H_∞ 控制)

在4.3.1节中,针对以状态方程描述的被控对象,给出了基于状态反馈的极点配置法。如果极点可以自由配置,从原理上来讲,就可以任意设定反馈控制系统的特性。但有时极点与特性之间的关系难以得到。这种情况下,如果能建立一种反馈控制系统的评价函数,就可设计出基于该评价函数的最优反馈控制系统。根据这种思想建立的控制理论,一般称为最优控制理论(optimal control theory)。随所选取评价函数的不同,最优控制理论也分成很多种。

1. LQ 最优控制

LQ最优控制诞生于20世纪60年代,是现代控制理论中具有代表性的理论之一。

对于状态方程

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu & (A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times 1}) \\ y = Cx & (C \in R^{1 \times n}) \end{cases} \quad (4.86)$$

考虑如下评价函数:

$$J = \int_0^\infty [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (4.87)$$

如果状态反馈控制规则的设计目标使该评价函数为最小,就称为LQ最优控制问题(linear quadratic optimal control problem)。

LQ最优控制: 设状态方程式(4.86)的评价函数为式(4.87)。其中, A, B 可控, 且 $Q \geq 0, (Q^{1/2}, A)$ 可观测, $R > 0$ 。这时, 使评价函数为最小的反馈控制规则可由下式给出:

$$u = -R^{-1} B^T P x \quad (4.88)$$

式中的 P 满足如下关系:

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (4.89)$$

该式称为 Riccati 方程(Riccati equation)。

LQ 最优控制中, 反馈控制系统的特性可以通过两个权数 Q, R 来进行调整。详细内容参阅文献[8]。

2. H_∞ 控制

H_∞ 控制理论(H_∞ control theory)出现于20世纪80年代, 是古典和现代控制理论的融合。控制系统的设计方法具有古典论的感觉(频域), 而在进行实际的控制规则计算时又具有现代论的感觉(状态方程)。

我们以图4.18中的控制系统为对象来对 H_∞ 控制理论进行研究^[9,10]。其中的 $H(s)$ 为一般被控对象(generalized plant), 它包括了控制系统(除被控对象之外)设计时用到的各种权函数。

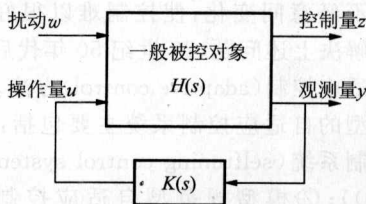


图 4.18 H_∞ 控制理论

这时, H_∞ 控制问题可以表述为对于一般被控对象 $H(s)$, 当给定常数 γ (根据所研究的问题来确定)时, 控制器 $C(s)$ 的设计目标为控制系统内部稳定, 且 w 到 y 的传递函数 $G_{yw}(s)$ 满足 $\|G_{yw}(s)\|_\infty < \gamma$ 。这里, $\|\cdot\|_\infty$ 是一个衡量稳定传递函数大小的尺度。对于单输入单输出传递函数 $G(s)$, 定义为

$$\|G(s)\|_\infty = \{\text{增益特性 } |G(j\omega)| \text{ 的最大值} \} \quad (4.90)$$

称为 H_∞ 范数(H_∞ norm)。

如果一般被控对象用状态方程来表示, 则该问题可归结为求解两种代数 Riccati 方程的问题(参阅文献[9], [10])。特别地, 称 $\|G_{yw}(s)\|_\infty$ 最小化问题为 H_∞ 最优控制问题(H_∞ optimal control problem)。

H_∞ 控制的最大的特点是迄今为止对于求解的各种控制问题大多都可以归结为 H_∞ 控制问题, 而各种控制的不同之处在于所采用的一般被控对象不同(图4.19)

H_∞ 控制理论的基础之一是鲁棒控制理

论(robust control theory)(将被控对象数学模型中存在的以显式方式加以考虑的控制理论)^[11]。其发展型有 μ 分析、 μ 设计(μ analysis, μ synthesis)等,详细内容参阅文献[13]。

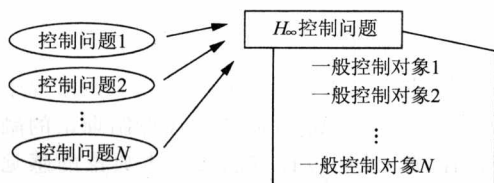
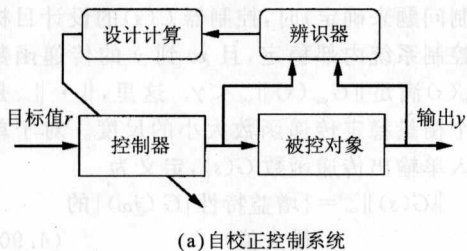


图 4.19 各种控制问题与 H_∞ 控制问题

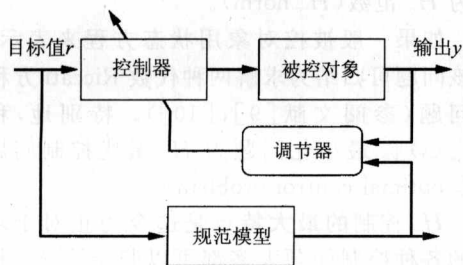
4.4.2 自适应控制

如果被控对象的数学模型完全已知,则它的控制问题很容易实现。但往往在多数场合下难以得到准确的数学模型,有时模型甚至会在不经意间变化,使控制难以很好地实施。为解决上述问题,20世纪50年代后期提出了自适应控制(adaptive control)方法。

典型的自适应控制系统主要包括:① 自校正控制系统(selftuning control system)(图4.20(a));② 模型规范型自适应控制系统(model reference adaptive control system)(图4.20(b))。系统①用于被控对象数学模型未知的情况。系统对被控对象的模型进行在线



(a) 自校正控制系统



(b) 模型规范型自适应控制系统

图 4.20 自适应控制的思想方法

(即工作状态)辨识,并根据辨识结果更新控制器。系统②则是尽可能使被控对象的响应接近规范模型(反映系统设计者要求的模型)的响应。为此,设置了能够根据被控对象的输入输出来决定如何对控制器进行调整的调节器。与①中的辨识器不同,②中的调节器是由直接调整控制器参数的计算规则所组成。详细内容参阅文献[13]~[16]。

这种模型存在不确定性的情况,前面曾提及鲁棒控制的解决方法,但是鲁棒控制与自适应控制还是有如下区别:

鲁棒控制:设计控制规则时的目标是尽可能减小不确定性的影响。

自适应控制:对不确定性尽可能进行辨识,并时刻修正控制规则。

现在,人们正在尝试将二者结合起来,即所谓的鲁棒自适应控制或自适应鲁棒控制,有关内容可参阅文献[17],[18]。

4.4.3 学习控制

对于具有不确定性的被控对象,还有一个颇有意思的控制策略,即学习控制(learning control)。该方法的实质是通过反复多次的试操作来获得所希望的控制结果。根据问题设定方式的不同,学习控制有以下三种类型:

改良过程(betterment process):在有限时间 $[0, T]$ 内定义目标值和伺服动作,通过函数解析来分析收敛性。在每次试操作时都要对初始状态进行重新设置(参阅文献[19])。

迭代控制(iterative control):在 $[0, T]$ 内给定目标轨道,伺服动作则与传统的线性控制理论相同,在 $[0, \infty]$ 范围内考虑。借助拉普拉斯变换或傅里叶变换来进行收敛性的分析,初始状态也是在每次试操作时进行重新设置(参阅文献[20])。

重复控制(repetitive control):将目标轨道看作反复出现的波形,通过内部模型原理来保障闭环系统的伺服动作。该方法的动作是连续进行的,不必进行初始状态的重置(参阅文献[21])。

4.4.4 其他

以上研究的是反馈控制。还可以将反馈控制与前馈控制组合,相应的控制系统称为2自由度系统(2d. o. f. control system)。2自由

度系统中,反馈部分使系统具有良好的扰动及模型误差鲁棒性,前馈部分则负责进行目标值响应特性的整形。利用这种方法可以获得更高性能的控制系統,详细内容参阅文献[7]。

前面研究的都是线性系统的控制问题。现实世界中的大多数系统往往是非线性的,称为非线性系统(nonlinear system)。实际上,几乎所有的系统都是非线性的。不过在很多情况下,在所研究的范围内可以将系统视为线性,因此线性控制理论仍然具有广泛的应用价值。对于那些难以看作线性系统的强非线性系统,以及具有本质非线性特性的系统,则需要利用非线性控制理论(nonlinear control theory)^[22,23]来研究。有关非线性控制系统的稳定性理论有李雅普诺夫稳定定理(Lyapunov's Stability theorem)、波波夫超稳定定理(Popov's hyper stability theorem)等,可以参阅文献[24],[25]。

最后介绍建模问题。控制规则的设计只有在给定被控对象的数学模型后才能进行。除了自适应控制是在线获得数学模型并据此进行控制外,其他的控制理论都需要先给定数学模型。获得数学模型的过程称为建模。通过实验数据(如输入输出数据的累积)求取传递函数或状态方程称为系统辨识(system identification)^[26]。目前,人们正在对鲁棒辨识(robust identification)(为进行鲁棒控制进行的辨识),即同时进行公称模型和不确定性估计的辨识方法进行研究,详情参阅文献[27]等。

大須賀公一

参考文献

4. 控制基础

- [1] 大須賀, 足立: システム制御へのアプローチ, コロナ社 (1999)
- [2] 大須賀公一: 制御工学, 共立出版 (1995)
- [3] 須田信英: 制御工学, コロナ社 (1987)
- [4] 吉川, 井村: 現代制御論, 昭晃堂 (1994)
- [5] 岩井, 井上, 川路: オブザーバ, コロナ社 (1988)
- [6] 前田, 杉江: アドバンスド制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店 (1990)
- [7] 杉江, 藤田: フィードバック制御入門, コロナ社 (1999)
- [8] 加藤寛一朗: 最適制御入門, 東京大学出版会 (1987)
- [9] 美多勉: H_∞ 制御, 昭晃堂 (1994)
- [10] 木村英紀: H_∞ 制御, コロナ社 (2000)
- [11] 木村, 藤井, 森: ロバスト制御, コロナ社 (1994)
- [12] 劉, 羅共訳: ロバスト最適制御, コロナ社 (1997)
- [13] I.D. Landau, 富塚: 適応制御システムの理論と実際, オーム社 (1981)
- [14] 市川, 金井, 鈴木, 田村: 適応制御, 昭晃堂 (1984)
- [15] 新中新二: 適応アルゴリズム—離散と連続, 真髓へのアプローチ, 産業図書 (1990)
- [16] 鈴木隆: アダプティブコントロール, コロナ社 (2001)
- [17] 金井喜美雄: ロバスト適応制御入門, オーム社 (1989)
- [18] 計測と制御「特集 適応・学習制御システムの新展開」, 計測自動制御学会, Vol.40, No.10 (2001)
- [19] 有本卓: 新版ロボットの力学と制御, 朝倉書店 (2002)
- [20] 美多, 大須賀: ロボット制御入門, コロナ社 (1989)
- [21] 中野, 井上, 山本, 原: 繰り返し制御, コロナ社 (1989)
- [22] 島ほか: 非線形システム制御論, コロナ社 (1997)
- [23] 美多勉: 非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論, 昭晃堂 (2000)
- [24] 平井, 池田: 非線形制御システムの解析, オーム社 (1986)
- [25] 井村順一: システム制御のための安定論, コロナ社 (2000)
- [26] 足立修一: ユーザーのためのシステム同定理論, コロナ社 (1993)
- [27] 計測と制御「特集 制御のためのモデリング」, 計測自動制御学会, Vol.37, No.4 (1998)

第5章 计算机科学基础

计算机科学包含许多研究领域,不过既然计算机是靠程序进行工作的,所以如何编程就成为其中最重要的问题。随着计算机语言的发展,现在已经可以利用一些工具简单地实现编程工作。但是,在很多情况下,不仅需要能够完成处理任务,更应该了解在何种程度上占用计算资源的问题。计算资源即所需的计算时间和内存容量。在设计高效率的处理方法或问题解决方案时,对计算效率进行数学分析,并从本质上了解所处理问题在计算方面的复杂性是非常重要的。

5.1 算法设计与分析

1. 什么是算法

算法即计算机解决问题的步骤。如果用自然语言就能够清晰地描述算法,那么就不必使用计算机语言。实际上,很多情况下算法就是用自然语言来描述的。这是因为算法主要是一种概念性的词汇,没有必要将其与具体的程序对应起来。

那么是不是所有解决问题的步骤都能称为算法呢?实际上,人们一般只是把那些效率较高的步骤才称为算法。

如上所述,算法这一概念本身是抽象的,且计算机系统与计算机语言又相互独立,故算法的效率也是一个抽象的概念。

2. 计算模型

一般来说,为了在算法理论中引入量的尺度,都是先设定计算机模型,然后再进行研究。人们提出的计算机模型多种多样,从最原始的图灵机到与现代计算机最为接近的随机存储机。这些模型的基本思想都是将机械进行一次操作所需的时间作为单位时间,并依据整个计算所花费的时间对计算效率作出评价。

当然,抽象机械的一次操作与真实计算机的一次操作之间存在很大的区别。即使是最原始的机器语言,一条机器语言指令的执

行也对应着抽象机器中的多个操作,且操作次数的多少随机器语言指令的不同而各异。

为了正确评价计算时间,需要建立模型计算机与真实计算机演算之间的准确对应关系。这种努力是否会有所收获呢?实际上,由于CPU中应用了多种并行运算技术,准确评价算法计算时间的公式几乎是无法得到的。

3. 基于算法比较的分析

如上所述,准确预测算法所需计算时间的式子几乎是不可能得到的。为此,可以转换一下思路,即不去预测计算时间,而是对计算效率进行分析,并以此作为比较算法计算效率的尺度。那么,算法比较中什么才是起关键作用的因素呢?方法之一就是利用统计学的手法,对大量例题的实际计算时间进行比较。实际上,一些注重实用的专业性学会拥有大量称为基准测试程序的通用标准数据。人们往往利用这些数据进行计算,再根据所需时间的多寡即可进行算法的比较。

但是,根据有限测试数据的计算时间来进行比较显然是不充分的。

算法理论中更多采用如下更具一般性的比较尺度,即随数据量的增加在计算时间上所表现出来的增量。例如,两个算法A、B的计算时间分别为 $T(A)$ 、 $T(B)$ 。对于数据量 n , $T(A) = 100n + 1000$, $T(B) = 2n^2 + 5n + 100$ 。当数据增加一倍时,算法A的计算时间最多增大到原来的2倍,而算法B的计算时间却增加到接近原来的4倍。

由这个例子可以看出,当把算法的计算时间表示成以数据量为变量的式子时,可不考虑系数,只根据最高次幂的大小来比较。很多情况下算法计算时间的表达式并不是唯一的,因而一般都是利用表示算法计算时间上、下限的式子来对计算效率进行比较。

算法理论中算法比较的基本方法,是忽略那些细微的差异后,看算法之间是否存在

明显的差异。

4. 计算时间分析的例子

下面让我们来考虑如下一个具体的例子。

[最大区间差问题] 设 n 个数据保存在数列 $a[0], \dots, a[n-1]$ 中, 试求差值 $a[t] - a[s]$ (区间差) 为最大时所对应的区间 $[s, t]$ ($0 \leq s < t < n$)。

从 n 个数据中取出两个数据, 并按照升序排列, 就定义了一个区间。按照该定义, 区间的个数最多为 $n(n+1)/2$ 个。将这些区间全部列出, 即可从中找出最大的区间差。由此可知, 所需最大时间正比于 n^2 。但这是不是最好的呢? 在以 t 为区间终点的所有区间中, 区间差最大的是以区间 $[0, t]$ 中的最小值为始点的区间, 记为 $\text{MIN}(t)$ 。下面的问题是如何高效率地求出 $\text{MIN}(t)$ 。

若把对应区间的所有值都计算出来, 即可找出 $\text{MIN}(t)$ 。但这种做法的效率非常低。为此, 可以利用递归方法。即在求 $\text{MIN}(t)$ 时, 充分利用已知的前一时刻的值 $\text{MIN}(t-1)$ 。因为 $\text{MIN}(t-1)$ 是 $[0, t-1]$ 内的最小值, 当将其扩展到 $[0, t]$ 时, 只需要与 $a[t]$ 比较即可。也就是说, 若 $\text{MIN}(t)$ 与 $\text{MIN}(t-1)$ 的值不同, 则只有当 $a[t] < \text{MIN}(t)$ 时, 才用 $a[t]$ 取代 $\text{MIN}(t)$ 。上述思路可用如下的算法给出:

```
msf=0; min=a[0];
for t=1 to n-1{
    if (a[t]-min>msf)
        msf=a[t]-min;
    else if (a[t]<min) min=a[t];
}
```

output "maximum difference is" msf;

该算法中只有一个循环体。每次循环的操作最多只有两次条件表达式评价和一个赋值语句, 故总的操作次数正比于数据个数 n 。可见, 该方法与前述正比于 n^2 的算法相比, 具有本质的优越性。

5. 计算时间的上限和下限

上述求最大区间差的算法在某种意义上是最佳的, 难以进一步改善。这是因为要想求解上述问题, 必须读入所有的数据, 计算时间又是与数据量成正比, 而该算法所求解的正是正比于数据量的计算时间。由此可知, 如果忽略比例系数, 更进一步的改善是不可能的。

在算法理论的计算时间表达式中, 大多是忽略比例系数和低次项, 用最高次幂的项来求计算时间的。前述正比于 n^2 的算法, 表示其最大计算时间正比于 n^2 , 称计算时间为 $O(n^2)$ 。由于读入数据的时间一定与数据量 n 成正比, 因此此后的处理无论怎么改进, 所需计算时间也将正比于数据量 n 。从这个意义上, 称计算时间为 $\Omega(n)$ 。

也许有人会说, 忽略比例系数会影响算法分析的可信度。需要注意的是, 这里分析的目的不是为了获得预测计算时间的公式, 而是将分析作为一种工具, 以便对算法的性能进行本质上的比较。

已经知道, 当算法的计算时间为数据量的函数时, 很难得到准确的表达式, 因而一般都是用函数值的上限和下限来表示。

排序法(sorting)是将 n 个数据按大小进行排列的方法。插入法即为排序法的一种, 它是将数据一个个取出, 并按大小顺序将其插入到已经排好的队列之中。在这种情况下, 找到正确插入位置的一般原则是依次搜索。当给定输入为已排好序的队列时, 每次只需进行一次搜索就可以找到正确的插入位置, 故处理可以在正比于数据量 n 的时间内完成。但是, 如果输入为逆序排列, 则每次比较都必须进行到最后, 此时所需时间正比于 n^2 。虽然计算时间有时正比于 n , 但是最差需要花费正比于 n^2 的时间, 所以称插入法的计算时间为 $O(n^2)$ 。

6. 计算问题的计算复杂度

应该怎样评价上述排序问题计算方面的困难程度呢? 一般比起算法的计算复杂度的分析, 计算问题的计算复杂度的分析要困难得多。首先, 我们来考虑排序问题计算复杂度的上限。由于针对任何输入, 插入法均能在 $O(n^2)$ 的时间内完成处理, 故称排序问题的上限是 $O(n^2)$ 。

此外已知一种称为堆排序的方法, 对于任何输入形式, 均能在 $O(n \log n)$ 的时间内完成处理。因此排序问题(较好)的上限为 $O(n \lg n)$ 。另一方面, 人们还掌握了一些输入的例子, 表明在采用某种算法进行排序时, 需要进行与 $n \log n$ 成正比的次数的比较。从这个意义出发, 也可以认为排序问题的下限为

$\Omega(n \log n)$ 。可见排序问题的上限和下限是相同的,在这种情况下可利用符号 Θ ,称排序问题的计算复杂度为 $\Theta(n \log n)$ 。

7. 多项式与指数函数的区别

算法理论中所谓的问题可解,是指存在这样的算法,其求解的时间为数据量的多项式,而问题不可解是指这样的多项式不存在。

但是,由于理论方面的困难,很难明确地判断多项式时间的算法是否存在。

为了区分简单问题和计算困难的问题,人们提出了 NP 困难性的概念。为了排除那些要求很长输出的问题,下面来考虑只要求 Yes/No 的所谓判定问题。如所周知的旅行商问题,即一个对给定的多个城市,求解通过全部城市的路线中总距离最短解的问题。对应于该问题的判断问题为:对于给定任意长度 L ,是否存在总距离小于 L 的环路。

当给定该问题的一个候补解,即一个环路时,其回答是否为 Yes,即环路的总距离是否小于 L ,这可用正比于环路长度的时间来判断。当给定候补解之后,如果存在一个算法,它用多项式时间判定该候补解是不是 Yes 解,则此问题属于 class NP。另一方面,如果存在一个算法,它用多项式时间判定 Yes 解是否存在,则此问题属于 class P。由定义知,属于 class P 的问题也属于 class NP,即后者为更广义的 class。

尽管 class P 与 class NP 之间是否有差别仍然是一个有待解决的问题,但几乎所有的计算机科学家都相信差别是存在的。差别究竟在何处的,在 class NP 中也是很困难的问题(NP 完全性问题),但人们都认为多项式时间的算法多半是不存在的。

8. 算法设计技巧

每一个问题都有各自高效率的解法,因此事实上算法的设计不得不针对具体问题加以研究。不过这并不妨碍人们在算法设计技巧方面的摸索。算法能够作为一个理论加以确立,其背景在于人们已经建立起了具有广泛适用性的算法设计方法。应该说,基于递归方法就是算法设计法的一种,其实此外人们还掌握多种其他算法设计法。

针对给定问题进行算法设计时,最科学的态度就是首先对现有算法设计法进行评

估,看是否能设计出更高效的算法。若没有一种方法是可行的,再考虑开发全新的算法。

下面举例说明。对于给定平面上的点集 S ,试求将 S 的所有点包含在内的最小凸多边形(S 的凸闭包)。这是计算几何学中具有代表性的问题,已经设计出很多种算法。在算法设计方面,一个基本的观察是凸闭包的顶点必定是 S 中的点。只有过 S 中的点 p 能够做凸闭包的切线时,点 p 才是凸闭包上顶点。这时,切线所分成的两个半平面中,必有一个包含了除该顶点外的 S 中的所有点。利用该性质,就可以在时间 $O(n \log n)$ 内判断是不是凸闭包上的点。如果能够将凸闭包的所有顶点开列出来,并依据与顶点重心的偏角进行排序,即可求出凸多边形。

上述方法所需时间为 $O(n^2 \log n)$ 。提高效率的最一般方法就是分割法。即首先将点集 S 分割成大小基本相同的两个子集,然后通过递归分别构成凸闭包,最后通过求两个凸闭包的公切线将二者合成为一个凸闭包。如果最后的合并操作能够在 $O(n)$ 内完成,则总的计算时间就是 $O(n \log n)$,即效率获得了显著提高。实际上,合并操作是可以在 $O(n)$ 时间内完成的,由于篇幅关系在此不再加以说明。

除了分割法之外,还有动态规划法、逐次构成法、扫描法、缩放比例法、分叉搜索法、参数搜索法、线性规划法等多种算法设计法。当上述方法全部尝试后,若仍不可行,这时再尝试开发全新的算法。这才是一种正确的思路。

浅野哲夫

5.2 计算机结构

5.2.1 计算机结构的定义和分类

计算机结构是指整个计算机或其一部分的构成。但对于该术语并没有明确的定义。“结构”这一词语常用于表示各个层面的构成。

计算机结构在广义上包括了从 OS、编程语言、应用程序等整个系统到寄存器、控制电路等下位硬件各个层次的构造。较为常用的是狭义计算机结构,以处理器为中心,包括其结构和一条条的指令。

狭义的计算机结构定义还可再大致分为

两种:一种定义依据软件指令系统的构造层次,从外部观察计算机的功能;另一种从硬件内部动作和构造来定义。两者之间的关系是相互制约、相互依存。

5.2.2 指令系统结构

指令系统结构中定义了指令系统(指令格式、处理内容等的定义)、寄存器组(寄存器的个数、位数、特殊寄存器的功能等的定义)、中断处理的内容等。了解了指令系统结构即可编写出可在该计算机上运行的程序。

一般情况下,寄存器的位数与数据的位数相等,且运算及总线传输的数据位数也与此有关。也就是说,不仅指令系统,硬件和整个计算机系统都受寄存器位数的影响。因此,人们常根据寄存器的位数,将计算机分为16位结构、32位结构等。

1. 按照操作数进行分类

根据运算中所指定操作数的个数,指令系统结构分类如下:

0——栈式计算机

1——累加器计算机

2,3——通用寄存器计算机

累加器计算机、栈式计算机先后退出了历史舞台,现在几乎都是通用寄存器计算机。指令系统结构有RISC和CISC两种形式。

2. 精简指令集计算机(RISC)

RISC(Reduced Instruction Set Computing)采用的是种类很少且长度固定的简单指令,通过这些指令的组合进行编程。尽管存在着上述缺点,但由于RISC具有指令编译时间和时钟周期短、单次可从内存中读取多条指令等优点,故目前在MIPS^[5], SPARC^[6]等结构中仍多采用RISC指令系统。

3. 复杂指令集计算机(CISC)

与RISC不同,CISC(Complex Instruction Set Computing)的指令长度是可变的,且一条指令可以完成更加复杂的处理。在RISC出现以前,计算机的指令系统基本上都属于CISC。Pentium Pro以后的IA-32(Intel Architecture 32-bit)系列CPU中,在CPU外部采用IA-32的CISC指令系统,在内部则变换成为 μ Op的RISC指令,然后再进行处理(在以往IA-32曾被称为x86结构)。

5.2.3 硬件结构的定义

有关硬件内部动作和结构的定义涉及面非常广泛,从指令控制方法、功能单元的构成、总线构成、内存构成、I/O构成等要素构成,直至上述要素如何配置和组合等整体构成。

1. 指令控制方法

指令控制方法定义指令在处理器内如何被处理,其中最重要的是执行顺序。

程序一般是以顺序执行为前提编写的。但是,如果指令只是一条条地顺序执行,处理器的性能将只与动作频率有关,性能提高受到限制。为此,可以利用程序的并行性来提高性能。

1) 流水线技术(pipeline)

将一条指令分解为指令的读取、分析、操作数读取、执行等步骤。在流水线处理中,将每一步分解成相应的处理(称为阶段(stage)),并将不同指令的不同阶段并列运行来提高处理能力。这里需要对阶段的分解方法加以定义。

2) 超标量体系结构

超标量体系结构(superscalar)拥有多个流水线和运算单元,多个指令能同时开始和结束的并行性结构。并行性的提取由硬件动态进行。目前的PC机和工作站的处理器均采用这种结构。这里需要定义并行执行指令间依存关系的分析方法。

3) 超长指令字(VLIW)

VLIW(Very Long Instruction Word)是通过将多个相互独立的RISC指令加以组合获得一条很长的指令,且每一个时钟周期发送一条指令的结构。通常并行性的提取(指令的组合)由编译器静态执行。由于同时也对前后VLIW指令间的相互关系进行分析,不必再由硬件进行依存关系分析和顺序的控制,因而能够构成结构简单的高速硬件。与硬件相比,编译器对计算机的性能影响更大。由于VLIW生成的代码在通用性方面较差,故互换性差。但Crusoe^[7]采用下述方法解决了互换性差的问题,即在执行IA-32指令系统的指令时,一边变换成固有VLIW指令,一边执行。

4) 多线程结构

多线程结构就是同时执行相互独立的多个线程的指令,缩减指令间的依存关系及由此引起的时间延迟,从而提高整个系统性能的结构。由于同时应用了指令级并行(ILP: Instruction Level Parallelism)和线程级并行(TLP: Thread Level Parallelism)等多种并行技术,故可极大地提高性能。Pentium 4 中即采用了所谓 Hyper Threading 的多线程技术。

2. 功能单元的构成

对功能单元即执行实际运算处理的部分的种类和数量进行定义。其中,执行加减乘除运算和逻辑运算的功能单元称为算术逻辑单元(ALU: Arithmetic Logical Unit)。

在简单流水线结构中,由于不存在多条指令执行并行处理(运算)的情况,因此功能单元只有 ALU,运算的内容则由指令的种类而确定。

在超标量体系结构这种并行处理多个指令的结构中,需要确定所需功能单元的种类和数量。功能单元的种类包括整数运算单元、浮点小数运算单元、Branch(分支指令处理)单元、Load/Store(存储器存取)单元等。

此外,增加一些特殊功能单元还可以提高某些满足特定要求的性能。例如,图像处理的数据量非常大,但处理过程只是简单的重复。为此,可增加一条单指令多数据(SIMD: Single Instruction Multiple Data)指令,以便多个运算单元共同执行一条指令,对多个数据并行运算。这种方式构成的功能单元,可以有效地提高处理性能。

例如,Intel Pentium 系列的 MMX, SSE 指令即是如此。又如由一个特殊寄存器读取内存中数组数据的多个元素,就能实现数组之间的向量运算,这种功能单元同样适宜于进行数据处理,尤其是科学计算等。

3. 总线构成

在总线的问题方面主要考虑两点:第一点,是否将内存总线(连接 CPU 和存储器)与 I/O 总线(连接 I/O)分离;第二点,是否将地址总线与数据总线分离。分离之后两者都能有效地提高性能,但成本较高。

在多个处理器连接起来执行并行处理的多处理器系统中,存在着共用总线的系统。

这种系统中,在全局上最重要的问题是总线构成以及存取的控制问题。

4. 存储器构成

对存储器的大小和读取方法加以定义。由于高速缓存存储器的层次结构以及各层次的容量对处理器的性能影响很大,因而是很重要的因素。

存储器的构成方法有两种:程序与数据保存在同一存储空间,以及各自分别保存在不同存储空间。目前在很多结构的主高速缓存存储器中,指令缓存与数据缓存是分开的。另外,在有些嵌入式处理器中,还使用相互独立的内存。

5. I/O 构成

对 I/O 与 CPU 之间的连接方法及数据存取方法加以定义。I/O 通过控制电路与 CPU 的外部总线连接在一起。CPU 对 I/O 数据的存取有两种方式:一是存储映像(memory map),即给每个 I/O 口分配一个存储空间地址,然后犹如存储器存取一样对 I/O 口的数据进行存取;二是 I/O 空间与存储器空间彼此独立,采用专用指令对 I/O 数据进行存取。

5.2.4 结构的确定方法

计算机结构从大型计算机到网络系统和嵌入式小型处理器等包括多种系统结构,应根据不同的用途来确定选用何种结构。

例如,在构建机器人传感器或电机控制的嵌入式处理器结构时,它所需的处理能力不必很强,倒是受成本和耗电量的制约较大。这就要求缩短指令系统结构中指令的长度,减少寄存器的数量。从硬件来说,则要求减小存储器的容量,简化指令控制。

同样是用在机器人上的处理器,如果处理图像,就要求有较强的处理能力,为提高数据处理的效率,可以扩大存储器存取的数据位数,或者增加数据并行处理的指令等。

5.2.5 嵌入式处理器结构

嵌入在机器人内部进行系统控制的较小型的处理器有 MIPS、SPARC、ARM^[8]、SH^[9]等。MIPS 和 SPARC 结构原本是以通用工作站为目标而设计的,最近被用于嵌入式处理

器中;而 ARM 和 SH 结构则从一开始就是以嵌入式为目标而设计 32 位的结构,同时具有 16 位的指令系统。它们通过限制程序代码的长度来减少存储器的使用量,并采用了减小耗电量的措施。

山崎信行

5.3 计算机语言

5.3.1 计算机语言概述

机器人中,驱动器的控制、传感器信息的识别、智能化动作规划等都要依靠计算机软件来实现。软件的编写需要借助计算机语言(或编程语言)。本节将对机器人系统所需的语言功能以及计算机语言的特点加以研究,讲解如何根据具体问题选择恰当的语言系统。

用任何语言编写的程序最后都要被翻译成机器语言来执行,尽管如此,并非说语言之间就不存在差别了。实际上,语言不同,概念和功能的表述就不同,编译方法也各异,执行的效率就会呈现区别。此外,程序开发和维护的成本也随所使用的语言存在很大的差异。

当程序比较小时,语言之间的差别表现不明显。如果程序的规模很大,则语言的选择就显得尤为重要。

编程语言既是程序员与机器(机器人)之间对话的工具,也是参与开发和维护的技术人员之间交流的媒介。因此,在很多情况下,选择全体研究人员都能够理解的语言,并通过语言扩展获得其最新功能的做法,要比选择最新的语言更加合理。

反过来说,就是切记尽量不要写程序。软件与硬件是存在区别的:软件拷贝不需要成本,而软件编写和维护的成本却比硬件还高。因此,充分利用已经普及的软件,尽量减少新编写的软件代码量是一种高效的方法,特别是互联网的发展进一步促进了人类共同财产的共享。

5.3.2 机器人系统要求的语言功能

下面对以下四种典型的机器人软件功能加以介绍:①实时控制;②传感及识别;③三维处理;④嵌入。上面的每个功能都不是机器人所特有的,但将这些功能组合起来从而

构成大规模的系统却是机器人所特有的。各个功能的特点如下。

① 实时控制。实时控制是一种满足时间约束的处理功能。所谓实时性,指能够在规定时间内完成必要的处理,以及正确估计所需处理时间的性能。在机器人中,为控制关节角,必须在 1ms 的采样时间内准确地启动处理进程,这是一个典型的实时处理问题。但实时性的实现并不仅仅取决于编程语言,还与硬件特性密切相关。例如,受到外界刺激或到达时钟设定点时的任务切换是操作系统的功能,但所需的时间却随着总线和高速缓存存储器使用方法不同发生变化。在研究语言的实时性时所涉及的问题有:是否应该不定期插入短处理时间来应付无用单元收集一类运行需要,能否采用线程描述非周期处理,能否在嵌入式软件中调用中断处理程序等问题。

② 传感及识别。即对力、速度、温度、亮度等物理量,以及图像、触觉模板等传感信息的处理和识别。它们的主要特点是必须面对庞大的传感信息量,尤其是图像,能达到 30MB($640 \times 480 \times 3\text{byte} \times 30\text{fps}$)。进行识别时,需要对这些模板数据多次扫描,并进行大量的数值计算。当需要对粒子过滤器等多种假说进行检验时,要求很强的计算能力,故并行计算非常重要。

③ 三维几何处理。机器人是在三维空间中运动的,因此大部分有关传感信息识别和动作规划的处理都涉及空间几何。例如,在计算机中建立机器人和物体的三维几何模型、进行坐标变换、求表面积和重量、对物体运动进行干涉检查,以及利用图形描述动作等。因此编程语言应该能够进行向量、矩阵运算、函数、连接表描述,并可在 Windows 系统上运行等。为了处理复杂的数据类型,还要求实现存储器自动管理。但这些要求与①的实时控制性是相矛盾的,故往往容易出现问题。

④ 嵌入。机器人的程序大多被储存在 ROM 中以嵌入的方式使用。机器的运行环境不一定非是工作站、PC 机不可,所能利用的资源也受到限制。当运行环境不同时,就需要使用交叉开发系统。因此对于语言来说,要求编程能够独立于操作系统和运行系

统,在小规模硬件环境下仍然具有较高的运行效率,且开发环境互换性较好等。

这些功能在单独一种语言中几乎是无法完全实现的。为此,可以采用如下的方法,即将系统分解成多个组件,各个组件分别采用不同的语言编程。这时,各组件间信息交换的网络通信功能就非常重要。利用网络功能可实现分散并行处理,从而提高整个系统效率。不过系统的维护会变得相当复杂。

5.3.3 计算机语言的特点

语言处理系统分为解释器和编译器两种。解释器就是对源程序的语句解释一条执行一条,编译器则是先将源程序转换成机器语言,然后由 CPU 直接运行机器语言。编译型语言比解释型语言快 5~20 倍,而且编译时还进行程序语法检查,所以正式的程序都用编译型语言编写。

不过,解释型语言属于对话运行方式,不需要编译和连接,且容易调试,故在编写小型程序时显示出很大的优点。特别是 Sh、Perl 等外壳语言或脚本语言,也称为胶水(用胶水粘在一起)语言,可方便地用于将其他编译型语言编写的组件程序组合起来一起运行。

下面讲解 C/C++、Lisp、Java 及其他语言的特点,并说明它们与机器人软件所要求的四个功能之间的关系。

1. C/C++ 语言^[1]

在编写 Unix 系统后 C 语言的可用性得到证实,随后于 20 世纪 70 年代作为微型和小型计算机高级语言被普及。既然能够编写操作系统,就应该能够对输入输出设备实现控制和中断处理,因而也就能够满足机器人硬件层面的控制要求,而比特、字节等数据类型的使用,提高了存储器的使用效率。C 语言是函数型语言。函数定义属于一级定义,因此难以对变量名和函数名的作用域进行详细的控制。但是,由于作用域规则比较简单,容易掌握,因而很快获得普及。同时,表达式和语法功能较为简单,语句所对应的机器语言容易想象,故也适宜于设备的控制。

C 语言应用于大规模系统时的不足之处在于它只能在一级函数的水平上进行抽象。为了弥补这一不足,宏的应用逐渐增多,因

而/usr/include作为头文件日益增加,程序开头附上#include语句也越来越多。由于宏的组装非常巧妙,所以维护起来也比较困难。究其原因,主要是 C 语言的抽象化水平较低所致。为此,20 世纪 80 年代诞生了面向对象的 C++ 语言^[2]。由于类定义具有了继承性,且能够分别定义对象内部的名字和对外公开的名字,从而极大地促进了软件的商品化和可重复利用性。后来,C 语言还成为了 ANSI 标准,且通过 POSIX 实现了库的标准化。

C++ 是 C 语言的主语言,无论是 C 编写的源程序、C++ 编写的检查程序、C++ 编写的多重继承和假想类,都能够在 C++ 环境下正常运行。对于已经熟练掌握 C 的程序员来说,掌握起来很容易。但也正因如此,使得 C++ 停留在“更加合理的 C”的水平,无法充分发挥 C++ 的功能,机器人用的很多类库都难以得到。

C++ 是面向目标的语言,与 C 一样,它也没有存储器自动管理功能。因此,如果稍加留意,在编写实时程序时可以不作异步无用单元收集的处理。不过,如果此时程序员对存储器实施管理不善,容易出现内存溢出(memory leak)的现象。

C/C++ 的编译器可以生成机器语言的效率很高,因而在诸如模式识别、矩阵等数值计算、几何运算等方面能最大限度地发挥功能。它尽管也能够描述几何模型或者比较复杂的结构,不过一般常用的方法是在程序的开头定义连接表处理程序,即定义 mini lisp。

Unix 的操作系统中已经嵌入了 C/C++ 的开发环境,故在 Unix 上进行程序开发的效率最高。GNU 的 C 编译器属于 retargettable 构造,库的源代码中也提供开放版源代码,因而能较为容易地构筑交叉开发环境,编写出易于嵌入到目标设备中的代码。

2. Lisp^[3]

Lisp 作为面向人工智能语言,于 20 世纪 50 年代开始应用。其特点在于将程序和数据均作为连接表来处理,易于进行解释执行。现代 Lisp 的标准 Common Lisp 中已经拥有完备的编译器,不仅数据类型可以列表,还具有多精度数值、数组等基本数据类型,以及可由用户定义的扩展数据类型。现在,基于

CLOS(Common Lisp Object System)的面向对象扩展功能也成为一种标准。

Lisp 程序都是先编译成机器语言然后再执行的。不过通常程序开发都采用解释器来进行,甚至已经编译完的程序也可以用来作为运行库充当解释器。Lisp 处理系统对存储器的管理是完全自动的,但是需要的自由空间至少是最低使用空间的 2 倍。因此,Lisp 的程序执行系统很大(10M 以上),无用单元收集大约占用数十毫秒以上的停顿时间,因而不适宜于嵌入到机器设备中执行伺服等实时控制。

Lisp 属于通用语言,可用于 Emacs、Web 等服务器,但真正能够体现价值之处在于人工智能的识别程序、几何建模,即开发复杂结构和复杂算法的场合。Lisp 不仅具有优异的语言表达能力,而且交互编程环境良好,因此开发程序的时间会比 C 语言缩短很多。它的不足之处在于源代码的表述方式与自然语言差别比较大,学习起来有些困难,而开发出来的程序可读性不强。至于在机器人编程语言方面的应用,可以举 EusLisp(电总研和产总研),它具备面向对象的编程功能,以及几何建模、并行编程等功能,因而用于仿真等研究开发^[4]。

3. Java^[5]

Java 是随着互联网的普及于 20 世纪 90 年代产生的面向对象的编程语言。它追求的是紧凑和简洁,而非 C++ 那样具有丰富的功能。其最大特点在于能够预先对程序的危险动作进行检查(这里的危险动作指对受到禁止的存储器、文件、手续(函数)等的存取操作)。

为了实现这个功能,Java 程序被编译成称为字节代码的中间语言。执行时,首先由检验程序对字节代码的安全性进行检查,然后再进行解释执行。一般来说,危险的程序动作大多由指针所引起,而字节代码中不带指针操作,故保证了高的安全性。

字节代码是解释执行的,运行效率很低。于是人们开发出了 JIT(Just-In-Time)编译器,它可在即将开始执行前将程序编译成机器语言,从而获得了毫不逊色于 C/C++ 的运行性能。由于中间经过了字节代码,结果不但不再需要依赖于硬件平台编写程序,而

且具有安全检查的功能,因此特别适宜于编写互联网上发布的程序。在实际使用过程中,人们曾经发现了 Java 存在着几个安全漏洞,为此又开发出了能够更加简便地在互联网上发布程序的语言 JavaScript 等(与 Java 无关),从而结束了 Java 在网络编程领域一枝独秀的局面。

Java 是在软件产业快速成熟的过程中诞生的语言。不幸的是,其规范和普及竟然沦为争权夺利的工具。

尽管 Java 具有存储器自动管理的功能,但它与 Lisp 一样,有时也需要暂停运行进行无用单元收集,故无法用于实时性要求较高的场合,例如同步控制。Java 的水平介于 C 和 C++ 之间,或者说介于 C 和 Lisp 的中间。虽然功能不如 C++ 和 Lisp 那样丰富,但很容易掌握。同时由于 JIT 编译性能,在模式处理方面也不存在任何问题。

Java 没有连接表功能,不过借助类定义它能非常方便地实现相同功能。有报道说,Java 比 Lisp 更能提高人工智能程序的性能。说到 Java 在嵌入方式应用的性能,尽管与 Lisp 的缺点一样,所花费的运行时间比较长,但是实际上目前在手机、PDA 等产品中已经获得嵌入式应用的实例。研究表明 Java 还有一个优点,即适合分散编程,现在已经出现了将多个 Java 程序嵌入机器设备中实现分散控制的 JINI 技术。

4. 其他语言

在用计算机进行数学或数式处理时,有时人们会使用 Maple、Matlab、Mathematica 等系统。这些系统采用专门语言,主要用在理论验证或者离线仿真场合,通常人们编写一些小型的专用程序,验证完成后就把这些程序也随之作废。不过,现在人们已经能把数式处理语言嵌入到大型程序中,作为整体的一部分来运行了。例如,用 Matlab 语言简便地编写矩阵计算和信号处理程序,在完成仿真后以 C 语言的形式输出,然后再与其他的 C 语言程序连接起来应用。

随着互联网的普及,很多应用开始将 Web 浏览器作为人机接口的界面。如果希望通过互联网对机器人程序进行控制,就需要与其他系统协同工作。在用 CGI 启动的场

合,一般的做法是将 Perl、PHP、Ruby 等外壳语言作为 Servlet(小服务程序)嵌入到 Web 服务器中,用 Java 来编写。

如前所述,全部功能由单独的一种语言来实现并不是一种好方法。应该根据具体情况选择恰当的语言,或者采用分散系统来实现,这样既容易开发和维护,也可以柔性应对技术进步。如果一定要用一种语言来完成所有工作,那么目前最好的是 C/C++,今后的趋势将是 Java。

松井俊浩

5.4 实时处理

5.4.1 实时处理的特点

对于实时处理,除了要求结果的逻辑正确性以外,还要求结果产生时刻的正确性^[4]。换言之,在产生逻辑上正确的结果的同时,如果满足时间约束也同样重要,就称之为实时处理。

实际生活中,人们在很多情况下最希望得到的不是那些不满足时间约束的高品质的结果,倒是能够满足时间约束但品质较低一些的结果。

例如障碍物回避系统,在特定时间内告知障碍物的大致位置要比在特定时间后告知精确位置更加重要。再有,在电视会议系统这类多媒体应用系统中,与低传输速度高品质图像相比,人们更乐意获得模糊的,但高传输速度的图像。

实时处理的另一个特点就是速度并不一定很重要。很多情况下人们都将实时处理与高速处理等价看待,这其实是一个很大的误解。

通过高速处理来满足各种时间约束的想法,只不过是提高平均性能来提高系统性能这一思想的延伸。实际上,基于这种概念所提出的方法有时难以保证最低性能的要求,因而不宜用于实时处理。

例如,在 video-on-demand 中,即使某一帧图像早于预定时间到达,播放时,该帧图像本身并无改变。反而因为图像过早到达,使接收端要花费更大的缓存去保持该图像。相反,如果能够准确地保证图像帧到达的时间间隔,则接收端所需的缓存可以较少。如果每一帧图像的到达时间与接收端的播放速度能够匹配,就不会对播放产生任何影响。

5.4.2 时间约束

实时处理的时间约束常常用开始处理的最早可能时刻和结束处理的最晚可能时刻来表示。前者称为释放时间(release time),后者称为截止时间(deadline)。当处理必须按照周期执行时,每次处理的释放时间的偏差往往十分重要。时间的偏差称为晃动(jitter)。

按照强弱程度,可将时间约束分成两种:如果某处理不能满足时间约束,它对系统的贡献度为零,这种时间约束称为硬实时(hard real-time)。如果某处理虽不能满足时间约束,但是对系统的贡献度只是有所下降,这种时间约束称为软实时(soft real-time)。

时间约束的另一种分类标准是对时间约束的苛刻程度。例如,在时刻 0 处,对于一个需要运行时间为 30 的处理,如果将处理的截止时间设定为 31,就称该截止时间苛刻(tight)。如果将截止时间设定为 60,则称该截止时间松弛(loose)。

5.4.3 时间预测性

在设计满足各种时间约束的实时系统时,要求系统对硬件和软件所有处理的时间拥有预测性(predictability)。所谓时间预测性,就是特定处理的完成时刻与预测时刻之间具有怎样的接近程度。

例如,若某处理的完成时刻总是与预测时刻基本一致,就说该处理的时间预测性高。反之,若同一处理的运行时间分散性较大时,则说该处理的时间预测性低。

1. 硬件的时间预测性

近年来,硬件技术取得了飞速发展,但对于时间预测性来说,不利因素反而增多了。

例如,高速缓存和流水线技术能够提高平均处理能力。但是,如果出现高速缓存缺失或流水线停顿,性能就会急剧降低。这种处理时间的差值是导致时间预测性降低的原因之一。

同样,DMA、TLB 等采用所谓的硬件投机运行来提高处理能力的很多技术也往往导致时间预测性的下降。因此,对于那些时间约束较强的实时处理,倒是常常选用结构较

为简单的硬件。

2. 软件的时间预测性

在开发实时处理软件时,存在着以下障碍:

1) 编程语言

目前的编程语言,很多都不能对时间约束进行特定的操作,因而程序员难以对每一个处理以十分细微的精度指定时间约束。

针对这个问题,有人试图设计新的语言规范,开发专用编译器,但这些特殊的语言一般来说很难得到普及。

2) 编译器优化

很多编译器在生成目标代码前,都要对程序的逻辑构造进行分析,从而预测出运行时最有可能采用的路径。在此基础上进行优化,即有可能缩短平均运行时间。

但是,此时执行预测路径的场合与执行其他路径的场合在运行时间方面会产生很大的差异。也可以说处理的时间预测性很低。

3) 多道编程

近年来,除了简单的嵌入式系统外,基本上采用的都是多道编程(multiprogramming)。多道编程能实现多个程序高效率共享 CPU。但由于各个处理之间的相互影响,有时很难保障实时性。

5.4.4 实时操作系统

能够尽可能避免预测性低下的机制就是实时操作系统(RT-OS)。

传统 OS 的目的是获得最高的平均性能,而 RT-OS 的目的则是为每个处理提供时间预测性。为此,RT-OS 具有多种保障最低性能的机制。

1. 优先级

RT-OS 与传统 OS 的最大不同点在于它对每个处理增加了基于时间约束的优先级。优先级既可以固定,也可以随系统运行而动态变化。前者称为固定优先级(fixed priority),后者称为动态优先级(dynamic priority)。

2. 调度

采用固定优先级对每个处理进行调度的算法中,具有代表性的是调度算法(RM: Rate Monotonic)算法。该算法用于处理周期性问题,且处理的周期越短,优先级越高。另外,

采用动态优先度的算法中具有代表性的是最早时限优先(EDF: Earliest Deadline First)算法。该算法中,截止时间(deadline)越早,优先级越高。

实时调度算法随应用程序的时间约束不同而具有不同的优化结果。因此,很多情况下,一个 OS 常常拥有多种可相互切换的状态。例如,在 SHARK^[9]中,有 10 种以上的调度算法模块可供选择,且有 5 种以上服务器方式可供选择来提高非周期任务响应时间。

3. 优先级逆转问题与共享资源存取协议

实时 OS 总是执行全部处理中的最高优先级。但有时出现优先级高者被优先级低的处理无限制地阻塞的状态,这种状态称为优先级逆转(priority inversion)。优先级逆转使系统的可预测性降低,还是产生截止时间失效(deadline miss)的重要原因。因此应该尽可能避免出现这种状态。

优先级逆转问题主要发生在资源共享的情况下。例如,当 I/O 等优先级较低的处理已经获得共享资源后,即使优先级较高的处理要对该共享资源进行存取,也必须等待它被释放。另外,如果正在进行无需某共享资源的其他中等优先级处理,低优先度的处理也必须等待中等优先级处理结束后才能付诸实施。

采用传统的锁(lock)机制或同步机制,将无法保证由于阻塞而造成的优先级逆转的时间上限。但在 RT-OS 中,由于应用 priority inheritance protocol, priority ceiling protocol, 以及 stack resource policy 等技术,实际上是能够保证最短阻塞时间长度的。

不过,上述方式会增大系统的开销,因而出现了很多像 VxWorks^[10]那样能够决定是否每一个互斥(mutex)都应用优先级继承性协议(priority inheritance protocol)的操作系统。

4. 中断处理

I/O 中断处理是使预测性降低的另一个重要因素。一般情况下,I/O 中断的发生时刻是任意的,因此也就难以事先限制它对其他处理的影响。

为了减少上述影响,在有些实时系统中将中断屏蔽,而在应用的层面上则采用查询方式。另外,在中断有效的场合,为了最大限

度地减小它的影响,经常对中断处理采取对分化的处理方式^[1]。

Lynux OS^[1]采用了一种更加简捷的方式,即让内核线程继承已开通设备用户线程的优先度来进行中断处理,从而提高了高位优先度处理的时间预测性。

5.4.5 分散实时处理

在分散实时系统中,如果有多个处理通过网络协同作业,它们之间的通信也应满足实时性的要求。这种分散实时系统所要求的网络间的约束称为服务质量(QoS: quality-of-service)。

QoS是一个包括响应、可靠性、系统重构能力的广义概念。例如,与响应相关的指标包括通信延迟、带宽等。

能够保证QoS的网络称为实时网络。优先度的支持方式既有硬件方式,也有协议方式。如Responsive Link(RL)就采用硬件支持方式,可以同时实现硬实时通信和软实时通信。

5.4.6 实时系统的构建

在开发应用软件时,为了保证较高的实时性,必须考虑更低层的硬件和软件的特点。与此相关的研究领域有实时数据库以及考虑实时性的人工智能(RTAI)等。

目前,将控制领域和人工智能等不同层次的时间约束统一起来进行研究的事例还很少。今后,考虑并保证系统所需组件全时间约束的综合方法将会越来越重要。

山崎信行

5.5 通信

5.5.1 什么是通信

一般所谓的“通信”是指人与人之间传达思想的手段。计算机中的“通信”则是指计算机与人,或计算机与计算机之间的“信息”(data)交换。即涉及计算机通信(以下称数据通信)时,肯定有一方是计算机。例如,在互联网中,世界各地的计算机通过网络运营商连接在一起并进行信息交换,就是数据通信。下面对数据通信的基本技术加以介绍。

5.5.2 模拟信号与数字信号

如前所述,数据通信时一定有一方是计

算机,故数据传输时,需要进行一次数据向电信号的转换。电信号包括模拟信号和数字信号。模拟信号就是电振荡信号,或者说转换成电流或电压后的波形。采用模拟信号进行数据传输的方式称为模拟传输。传统电话就是模拟传输方式的例子。

模拟信号中的电压或电流是随时间连续变化的量。时间上不连续的信号,即电压的高低仅用特定值来表示的信号称为数字信号。采用数字信号的数据传输方式称为数字传输。计算机网络、移动电话等均为数字传输。

数字传输的优点在于数字信息的电信号很简单,能够有效地防止信号劣化,保证传输的稳定性。全部信息数字化后,只需一种传送线路即可完成传输工作。

数据通信中,根据传输线路的不同,需要进行模拟和数字信号之间的相互转换。例如,用电话线作为传输线路,应该先将数字信息转换为模拟信号,然后在接受端再转换成数字信号。将模拟信号转换为数字信号称为调制(modulation),将数字信号转换为模拟信号称为解调(demodulation)。

调制解调技术是数据通信中非常重要的技术。脉冲调制是调制的基本方式,可以把模拟信号转换为数字信号。脉冲调制时,每隔一定的时间进行一次模拟信号的采样(sample),并对采样信号进行量化处理,转换成二进制的数值。数字信号到模拟信号的解调与信号调制的步骤相反。

5.5.3 信号传输方式

数据通信中,数字信号和模拟信号在传输线路中的传输方式不同。数字信号的传输采用直流传送方式(基带传输方式)。模拟信号采用先将信号调制成载波频率,然后进行传输的宽带传输方式。

1. 基带传输方式

为数字信号0和1分配不同的电平,并以脉冲波形加以传送的方式称为基带传输方式。根据数字信号所分配电平的不同,分为不归零制(NRZ: Non Return to Zero)和归零制(RZ: Return to Zero)。此外,还有根据脉冲的有无进行分配的双极方式,根据脉冲的变

化进行分配的双脉冲方式,以及与曼彻斯特调制相对应,在1发生后立即进行极性反转的差动曼彻斯特调制等。

曼彻斯特调制的典型事例为 IEEE802.3 (CSMA/CD bus LAN),而差动曼彻斯特调制的典型事例则是 IEEE802.5(token ring LAN)。

2. 宽带传输方式

宽带传输就是利用正弦波那样的载波对数字信号进行(调制)传输的方法。其中,既有通过改变振幅将数字信号变换为模拟信号的振幅调制(amplitude modulation),也有频率调制(frequency modulation)和相位调制(phase modulation)。进行载波调制和解调的装置称为调制解调器(modem: modulator demodulator)。

宽带传输中,通过改变载波频率可实现一条传输线同时传输多个信号。这样,有线电视就不仅可以传送图像信号,还可以同时传送数字信号。

5.5.4 数据传输方式

数据通信中的数据传输方式有两种,即串行传输和并行传输。前者的传输线为一条,数据按照一定顺序一位一位地进行传输,后者的传输线由并列的多条线路组成,可以同时传输多个数据位。

WAN(广域网)和 LAN(局域网)都采用的串行传输方式,而计算机与打印机等外围设备之间则采用高速的并行传输方式。

5.5.5 数据传输模式

传送模式描述了数据传输的方向性和通信方式。它有以下三种,即只能沿一定方向传输的单工模式(simplex mode)、每一时刻只能进行单一方向传输的交互传输-半双工模式(half duplex mode)以及可以同时双向传输的全双工模式(full duplex mode)。单工模式和半双工模式都是只有一条传输线,而全双工模式则需要两条传输线(物理的或逻辑的)。

单工模式时,接收端只接收但不发送信号。半双工模式和全双工模式则能实现双向通信。半双工模式由于只有一条传输线,为了防止与对方发生冲突,信号发送前要求获得对方的确认。

5.5.6 通信协议

协议(protocol)一词常用来表示“外交礼仪”、“条约”等。由此可知,通信协议也就是指为进行数据通信而事先确定的章程。

通信协议由表示信息结构的格式(format)和信息交换的进程(procedure)组成。格式(format)规定了数据为何种类型、如何排列,至于进程则规定了数据以怎样的步骤和流向来实现信息交流。数据通信时,为了保证双方能够正确地收发信息,应该遵循相同的通信协议。

如果不同厂家和种类的计算机之间采用不同的通信协议,将它们连接在一起的网络将无法进行数据通信。为了保证彼此相连的不同计算机之间能够进行数据通信国际电信同盟,以国际电信同盟(ITU: International Telecommunication Union)、国际标准化组织(ISO: International Organization for Standardization)等机构为核心,一直在开展各种协议的标准化工作。其成果即为开放式系统互联(OSI: Open System Interconnection)参考模型。在 OSI 参考模型中,分别按照不同的功能,采用层来加以分类。

表 5.1 给出了 OSI 参考模型中关于层的划分及其功能。

表 5.1 OSI 参照模型的层及其功能

按照 OSI 参照模型的分类			概要说明
	层	层的名称	
上位层	第 7 层	应用层	用户服务程序之间的协议。文件传送、HTTP 等
	第 6 层	表示层	对字符代码、图像数据的形式进行转换,或加密等
	第 5 层	对话层	应用进程间的通信模式管理或通信控制
下位层	第 4 层	传输层	实现无差错虚拟通信线路的协议层
	第 3 层	网络层	进行计算机间的数据传输、数据路由选择
	第 2 层	数据链路层	规定了数据打包、物理节点地址、数据包收发方法等的层
	第 1 层	物理层	将数据转换成电信号等物理信息并进行传输

由表 5.1 可以看出,OSI 参考模型是由物理层(physical layer)、数据链路层(datalink layer)、网络层(network layer)、传输层(transport layer)、对话层(session layer)、表示层(presentation layer)和应用层(application layer)所构成。从物理层到应用层分别对应于第 1 层到第 7 层,其中第 1 层到第 4 层称为下层(系统间通信),第 5 层到第 7 层称为上层(进程间通信)。

下面介绍各层的概要。

第 7 层 应用层 该层为最上位的层,用于规定计算机用户所用应用服务之间的协议。该层能够分辨出所收到的数据来自于哪一个服务器。HTTP、TELNET 等很多应用协议都在这一层。

第 6 层 表示层 该层提供的是对网络中传输数据进行统一化处理的功能。在该层中,按照来自应用层的不同信息数据类型进行编码处理,或者加密处理。即将信息变换为能够在网络中通信的形式,或将所接收到的通过网络传输过来的数据恢复成服务器能够识别的形式。

第 5 层 对话层 在该层中确定与对方进行通信的路径和发送数据的方法。该层将对来自表示层的数据所采用的同步处理和通信方式(半双工、全双工等)作出规定,同时确立逻辑通信路径。

第 4 层 传输层 对经过细分的数据逐一实施管理,避免数据的遗失。如果发生数据缺损,由该层发出再发送的请求。具有代表性的协议有 TCP 和 UDP。

第 3 层 网络层 对包(最小数据单位)传送到对方时的 End to End 约定加以规定,并指明将信息发送到网络上的哪一台计算机。具有代表性的协议即 IP。

第 2 层 数据链路层 以网络层中所设定的接收方的地址为目标,对所经由的设备实施管理,即确立到达物理上连接在一起的中继点的数据链路连接。

第 1 层 物理层 对通信的物理部分进行管理,并将来自数据链路层的位信息转换为实际传送的电信号或电磁波。电缆的材质、接头的形状以及数据与电信号的相互转换方式(电压等)等即属于该层。至于物理层中数据的内容则无需了解。RS-232C 等的接

口标准、转发集线器、电缆类等即相当于物理层。

5.5.7 机器人系统中的通信

机器人系统是由电机等驱动系统、基于各种传感器的感知系统以及对前者进行控制的控制系统所构成。

机器人控制系统中,包括了机器人本体内各系统间的通信、机器人之间的通信、机器人与人之间的通信等多种层次的通信。特别是电机-主计算机的通信,全部采用串行和并行通信,能够完成机器人系统中最低层次的通信。

对于机器人来说,一般多采用对象请求代理(ORB: Object Request Broker)通信系统来构成模块化硬件或软件之间的机器人本体内的通信系统。

至于人-机器人、机器人-机器人之间的通信,较多的是采用 HTTP 或其他互联网的通信系统、通信协议,例如网络机器人系统。

原 功

参 考 文 献

5.2 计算机结构

- [1] 渡邊 茂ほか: マイクロコンピュータハンドブック, オーム社 (1985)
- [2] コンピュータ用語辞典編集委員会: 和英コンピュータ用語大辞典, 日外アソシエーツ
- [3] J. Hennessy and D. Patterson: Computer Architecture A Quantitative Approach Second Edition Morgan Kaufmann Publishers, Inc. (1995)
- [4] D. Sima et al.: Advanced Computer Architectures a Design Space Approach, Addison Wesley Longman Limited (1998)
- [5] C. Price: MIPS IV Instruction Set, MIPS Technologies, Inc. (1995)
- [6] D. L. Weaver and T. Germond: The SPARC Architecture Manual version 9, SPARC International Inc. (2000)
- [7] A. Klaiber et al.: The Technology Behind Crusoe Processor, Transmeta Corp. (2000)
- [8] ARM9E S Technical Reference Manual, ARM Limited (1999)
- [9] 日立 SuperH RISC engine SH 7750 シリーズ ハードウェアマニュアル, 日立製作所 (1998)

5.3 计算机语言

- [1] B. W. Kernighan and D. M. Ritchie: The C Programming Language, Second Edition, Prentice Hall (1988)
- [2] Bjarne Stroustrup: The C++ Programming Lan-

- guage Special Edition, Addison Wesley (2000)
- [3] Guy L., Jr, Steele : Common Lisp : The Language, Second Edition, Digital Press (1990)
- [4] 松井俊浩 : 幾何モデリング機能を備えたマルチスレッド並列オブジェクト指向言語 EusLisp, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5 (1996.7) pp.38-42
- [5] K. Arnold, J. Gosling and D. Holmes : The Java Programming Language, Third Edition, Addison-Wesley (2000)
- #### 5.4 实时处理
- [1] Giorgio C. Buttazzo : Hard Real-Time Computing Systems Predictable Scheduling Algorithms and Applications, Kluwer Academic Publishers (2000)
- [2] Jane W. S. Liu : Real-Time Systems, Prentice Hall (2000)
- [3] Hermann Kopetz : Real-Time Systems : Design Principles for Distributed Embedded Applications, Kluwer Academic Publishers (1997)
- [4] John A. Stankovic et al. : Deadline Scheduling for Real-Time Systems EDF and Related Algorithms, Kluwer Academic Publishers (1998)
- [5] John A. Stankovic : Misconceptions about real-time computing, IEEE Computer, 21 (1988) pp.10-19
- [6] K. Ramamritham and J. Stankovic : Scheduling Algorithms and Operating System Support for Real-Time Systems, Proceedings of the IEEE, 82 (1994) pp.55-67
- [7] John A. Stankovic et al. : Misconception about real-time databases, IEEE Computer, 32 (1999) pp.29-36
- [8] 山崎信行 : 分散制御用リアルタイム通信 Responsive Link の設計および実装, 情報処理学会論文誌 : コンピューティングシステム, Vol.45, No. SIG 3 (ACS 5) (2004.3) pp.50-63
- [9] <http://shark.sssup.it>
- [10] <http://www.windriver.com>
- [11] <http://www.linuxworks.com>
- [12] http://www.itscj.ipsj.or.jp/ipsj-ts/02_06/toc.htm
- #### 5.5 通信
- [1] マルチメディア通信研究会編 : 通信プロトコル辞典, アスキー出版 (1996)
- [2] 小泉修 : 図解でわかるデータ通信のすべて, 日本実業出版社 (1998)

第 2 篇 元器件

Robotics Handbook

第 1 章 传感器

1.1 传感器的基本工作原理和分类

传感器的主要作用就是给机器人输入必要的信息。例如,测量角度和位移的传感器,对于掌握手和腿的速度、移动的方向,以及被抓持物体的形状和大小都是不可缺少的。

根据输入信息源是位于机器人的内部还是外部,传感器可以分为两大类。一类是为了感知机器人内部的状况或状态的内部测量传感器(简称内传感器)。它是在机器人本身的控制中不可缺少的部分,虽然与作业任务无关,却在机器人制作时将其作为本体的一个组成部分一并进行组装。另一类是为了感知外部环境的状况或状态的外部测量传感器(简称“外传感器”)。它是机器人适应外部环境所必需的传感器,按照机器人作业的内容,分别将其安装在机器人的头部、肩部、腕部、臀部、腿部、足部等。

为了便于理解机器人传感器的特征和区别,值得对传感器的结构、形态、性能、方式、原理、用途进行比较,截至目前,传感器有各种各样的分类方法^[1~3]。例如,内传感器根据测量的对象不同,有表 1.1 所示的分类。如果不考虑内、外的差别,按照功能和检测手段进行分类,则可以参考表 1.2 及表 1.3。下面,简要地对常用传感器的工作原理和特征进行说明。

表 1.1 内传感器按照检测内容的分类

检测内容	传感器的方式和种类
接触或滑动	机械式、导电橡胶式、滚子式、探针式
特定的位置或角度	限位开关、微动开关、接触式开关、光电开关
任意位置或角度	板簧式、电位计、直线编码器、旋转编码器
速度	陀螺仪
角速度	内置微分电路的编码器
加速度	应变式、伺服式
角加速度	压电式、振动式、光相位差式

续表 1.1

检测内容	传感器的方式和种类
倾斜(平衡)	静电容式、导电式、铅垂振子式、浮动磁铁式、滚动球式
方位	陀螺仪式、地磁铁式、浮动磁铁式
温度	热敏电阻、热电偶、光纤式

内传感器大多与伺服控制元件组合在一起使用。尤其是表 1.1 中的位置或角度传感器,它们一般安装在机器人的相应部位,对满足给定位置、方向及姿态的控制不可或缺,而且大多采用数字式,以便计算机进行处理(详见 1.2 节)。

表 1.2 传感器按功能的分类

功 能	传感器	方 式
接触的有无	接触传感器	单点型 分布型
力的法线分量	压觉传感器	单点型 高密度集成型 分布型
剪切力	滑觉传感器	点接触型 线接触型 面接触型
接触状态变化	力觉传感器 力矩传感器 力和力矩传感器	模块型 单元型
近距离的接近程度	接近觉传感器	空气式 电磁场式 电气式 光学式 声波式
距离	距离传感器	光学式(反射光量,反射时间,相位信息) 声波式(反射音量,反射时间)
倾斜角、旋转角、摆动角、摆动幅度	角度传感器(平衡觉)	旋转型 振子型 振动型
方向(合成加速度、作用力的方向)	方向传感器	万向节型 球内转动球型

续表 1.2

功 能	传感器	方 式
姿势	姿势传感器	机械陀螺仪 光学陀螺仪 气体陀螺仪
特定物 体的建模, 轮廓形状 的识别	视觉传感器 (主动视觉)	光学式(照射光的形 状为点、线、圆、螺旋线 等)
作业环 境识别, 异 常的检测	视觉传感器 (被动式)	光学式 声波式

比较典型的外传感器就是视觉传感器。根据是否需要专门把光照射到对象物上去, 又可以将其分为主动视觉和被动视觉。通常的视觉传感器属于后者, 即相当于动物眼睛那样的非接触式的传感器, 根据照相机受光面上的明暗和颜色信息, 测量线的长度和倾角, 提取轮廓, 从而识别物体。例如, CCD 等的固体摄像元件(参阅 1.3 节)。

最近, 灵敏度和分辨率高的固体元件越来越普及, 今后随着元件的小型化、高速化及高功能化, 视觉传感器的应用范围将会越来越广。根据用途的不同, 视觉传感器可以分为检测距离和位置用途, 以及识别对象物形状、大小、朝向、颜色、温度等特征或分布的用途。一般情况下, 检测用视觉传感器是基于三角测量原理, 其输入量为长度和角度。也就是说, 将传感器稍作分离位于两处, 根据对象物和受光面的对应点, 确定上下方向和左右方向的角度参数, 将这些参数输入就能同时计算出与对象物的方向和相对距离(参阅 1.1.3 节)。如果摄像机位于两处, 利用两个影像信息的相关性可被动地确定各个参数。如果将一个摄像机换成激光光点, 借助于激光光束进行主动照射, 并且可以读取照射角度, 那么就能得到上述两个参数的具体数值, 于是, 用一台摄像机便可以完成三维位置测量。

安装在机器人手部的视觉传感器, 其方向可以和手部一起受到控制, 因此它能直接测量与对象物之间的距离和与对象物表面的倾斜程度。这种在一定程度上具有特殊用途的传感器, 能利用机器人的动作自动地确定某几个参数, 因此可以简化距离测量的计算。如果进一步让它发射出点状、线状、环形、螺

旋形状的光束, 实现主动视觉, 就能收到减少测量参数的效果, 有利于测量的高速化和高精度化。

表 1.3 传感器按检测方法分类

传感器	检测方法
光学式传感器	视觉、接近觉、分布视觉、角度觉、光泽、疏密、色觉
机械式传感器	触觉、软硬、凹凸
超声波式传感器	接近觉、视觉、距离觉
电阻式传感器	压觉、分布触觉、力觉、温度觉
半导体式传感器	压觉、分布触觉、力觉
电容式传感器	接近觉、分布压觉、角度觉
气压式传感器	接近觉
高分子传感器	触觉、压觉
生物传感器	触觉、压觉
电化学传感器	触觉、接近觉、角度觉
磁传感器	接近觉、触觉、方向觉、方位觉
流体传感器	角度觉
气体传感器	嗅觉

用于识别的传感器, 一般能够从对象物上提取几何学特征, 举例来说, 从获取的二维平面图像数据和多个距离数据中就可以计算出物体的形状、大小、曲率等特征。利用音响技术也能探测距离, 称为声波传感器。例如, 识别不可见区域中物体的超声波阵列传感器就属于这一类。在识别的过程中, 各种图像数据处理技术是十分有用的。例如, 假设图像数据的明暗信息能够转换成颜色或温度信息, 就能了解它们的分布状况。关于视觉信息处理的有关问题, 将在第 4 篇“智能技术”中进行详细叙述。

触觉传感器和力觉传感器与众不同的突出特点在于必须直接接触目标才能获取所需的信息。触觉传感器用来检测特定方向的力(通常判断有无接触), 而力觉传感器可以检测三个力分量, 或者再加上三个力矩分量在内的一共六个分量。实际上, 这些量值的变化不一定是连续的。因此, 如果采集信息的维数少, 传感器的结构就会简单。特别是接触觉传感器, 仅仅感知与物体是否接触, 使用电气开关就足够了, 这种传感器可以简单地用橡胶弹性体或弹簧等机械的手段构成(详

细内容参阅 1.3.2 节和 1.3.3 节)。

压觉传感器的作用是单方向(一维)、连续地检测力的大小,多数是利用了在产生机械应变的结构件上贴半导体应变片,其输出随外力的变化而改变的现象。单点型压觉传感器适合检测点状压力,分布型压觉传感器则适合检测成面状分布的压力。高密度集成压觉传感器是把一片夹有压感导电橡胶或压感电阻元件的电极排成阵列的形式高密度组装而成的。不过,如果橡胶或电阻元件本身带有滞回特性,外部压力即使被释放了它们也不会立即恢复原状,这将造成力的动态检测精度下降。另外,元件的密度增加后,信号线的排布会非常困难,有时需要巧妙地将若干元件并为一组,按组读取信号。此时还应该加上信号读取的扫描机制,如按照时间间隔进行扫描,或者按照调制频率进行扫描。

IC 制造技术的进步,催生了 VLSI(超大规模集成电路)压力传感器。压觉传感器和力觉传感器采用弹簧或其代用品的弹性体,它们的变形范围能够越小,实现传感器的小型化越有利。这些传感器大多把电极离散地排布,将电阻、静电电容^[4]、压电电压、霍尔电压^[5]、光量^[6]、共鸣频率^[7]等的变化作为电信号读取(图 1.1)。光量变化又分为直射型和反射型。共鸣频率变化型传感器的原理是在弹性体中有意挖出空洞,改变外压,即可改变空洞内空间的共鸣频率,从而实现触觉感知。这种传感器具有三维结构,代表了未来传感器的发展方向。此外也有采用浮动夹消除死区的机构^[8]。

滑觉传感器是用来检测位于接触部分的动态位移的。其接触部分一般呈针状,由酒石酸钾钠(rochelle salt)之类的压电材料制成,能把应力、应变转换成电参数,然后进行微分后再加以测量。如果是测量重力,由于作用力的方向是一定的,接触部分用滚轮即可,而且检测的灵敏度相当高。只要检测滚轮的转动变化即可得到滑动量和输入值。如果是面接触滑动,则可以同时安装多个可伸缩的点接触传感器,再根据它们的微分输出来综合评价滑动情况。目前,使用的面接触式滑觉传感器多数利用各向异性的导电橡胶采集信号,不过也有少数利用各向同性的导电橡胶的方法^[9]。

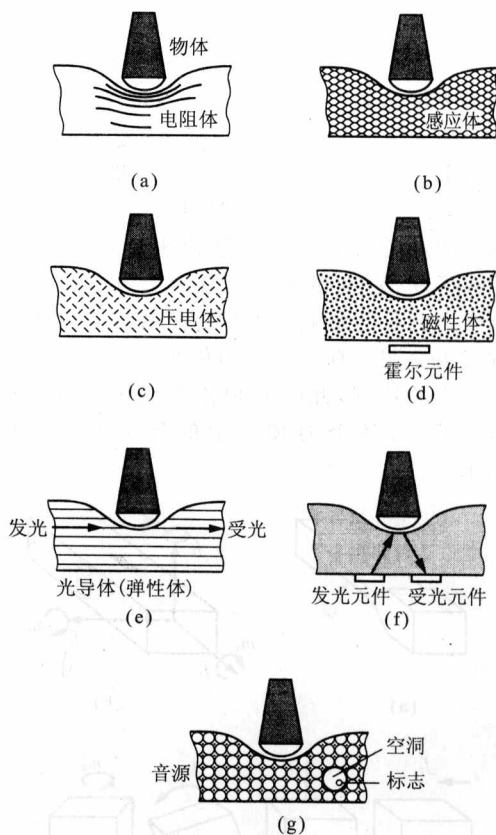


图 1.1 触觉传感器的信号输入方法

力觉传感器的原理是由作用力或力矩作用下产生的机械应变转换成电信号。半导体应变片经常被采用。为了提高检测灵敏度,通常在梁或其他骨架的内、外两面贴上应变片,将输出信号送入差动放大器中。此外还可以借助于桥式电路或 LVDT(差动变压器),然后经过普通的放大器进行放大。有时也可以引入光路代替应变片,机械应变将引起反射光量大小的变化,然后再转换成电信号输出。

为区别起见,可以将力觉传感器分成两类:一类叫做模块型,是将对特定方向的力变形敏感的结构件适当组合而得到的传感器;另一类叫做单元型传感器,是将上述结构件集成一体,消除了组合特性的传感器。图 1.2 举出一个组合型结构件的例子。图 1.2(a)示出了一根梁,图 1.2(b)示出了一个中央开槽的立方体,它等价于平行配置的两根梁。这些结构在薄壁部分均容易发生挠曲变形,将应变片贴在适当的位置,就能将机械应变转换为电量的变化。图 1.2(b)的结构件受到外

力后一般会出现如图 1.2(c) 所示的变形状态,不过由外力引起的变形仅仅为数十微米,在图中将它画得夸张了。与其他变形相比,由力和力矩分量 f_y 和 m_z 导致的变形小到对结构来说几乎可以忽略不计。如果作用力的性质是属于任意力同时作用的模式,一般来说用图示的方法很难表达出来。反之,即使掌握了变形,也很难由此分离出究竟是受了哪个力分量的影响。人们称这种混合变形的的方式为交调失真。单元型传感器容易发生交调失真的情况,此时必须依靠专用软件来进行解算,将各个力和力矩的各个分量分离出来。

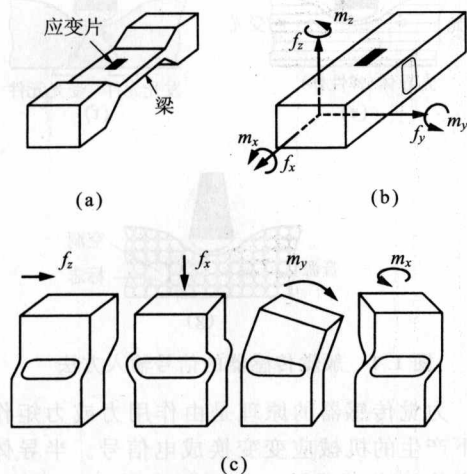


图 1.2 构成力觉传感器的梁和应变片

梁的结构设计及应变片的粘贴位置对传感器的小型化至关重要。它们彼此之间是相互联系的,应该同时兼顾,如果在细槽加工方面不存在时间问题,就可以选用简单易行的大功率输出激光切削加工工艺,而把主要精力集中在梁的结构设计方面。总之,应该考虑的问题是在轻型结构材料上粘贴尽量少的应变片,把交调失真控制在最小的范围之内。市面上的腕力传感器大部分都是基于这样的思路进行设计和实用化的,各个公司的产品目录上都给出了梁的独特结构。图 1.3 给出了几个手部单元结构的模型,它们的设计都很紧凑。图 1.3(a)是梁位于轴的内部,图 1.3(b)是梁位于轴的外部,图 1.3(c)~(e)是梁位于轴的周围的情形。就结构材料的加工工艺性而言,图 1.3(b)最简单。

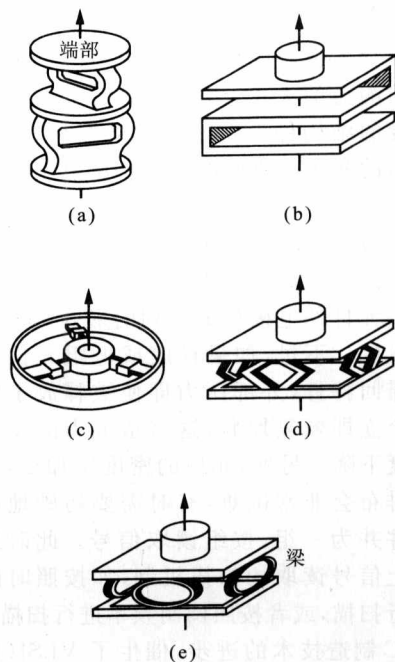


图 1.3 三维结构件的基本模块

接近觉传感器(1.3.4节)在接近区域内(0~20mm)检测物体存在与否,或者通过非接触方式测量与物体的距离。非接触检测方法一般采用光和声波的原理,但是在近距离的场合,空气压、磁场、电场等方法也很有效。例如,喷嘴以一定的压力喷出空气,如果它的前面有物体,则距离越近,喷嘴的背压越高。因此,测出喷嘴的背压后,就可以根据预先计算出的对应关系求出其到物体的距离,这就是空气式接近觉传感器的原理。磁场式或电气式接近觉传感器则是基于接近物体时,磁通或电场随距离的变化而产生变化的原理测量距离。磁场式接近觉传感器可检测钢铁等高导磁率的物质(容易产生电涡流),而电场式接近觉传感器则宜检测高分子材料等介电常数较高的物质。如果对象物为金属,那么用磁场方法测量距离会很有效,因此磁场式接近觉传感器常用于焊接机器人的示教或仿形控制中。光学式接近觉传感器的原理是利用发光元件发光,光被物体反射后,根据光敏元件接收到的光通量或光路变化来判断物体的存在或大概的距离。因此,被测物体表面必须研磨得像镜面那样,否则传感器无法选中目标。

距离传感器用来测量物体的距离,它可

以分为光学式和声波式。光学式传感器又根据利用反射光量、接收时间信息(包括反射时间)、相位信息等进行分类。图1.4是基于反射光量原理的传感器原理图(参阅1.3.4节)。图1.4中设置了一对发光元件和光敏元件,它们构成位于前方的圆锥形照射区和反射区,通过物体的反射,检测到达光敏元件的光量^[10]。在图1.4中还给出距离测量的光路几何学原理。这种传感器只能处理二进制逻辑信号,因此其信号处理简单,而且测量不受物体表面反射率的影响。如果改用激光或红外线进行测量,甚至还会受室内照明的影响,具有不依赖对象物的优点。此外,还有利用相位信息的传感器。如果物体表面满足漫反射条件,那么可以在一个光敏元件的周围配置四个发光元件,这样利用相位信息就能测量出物体的倾斜度(参阅1.3.4节)。

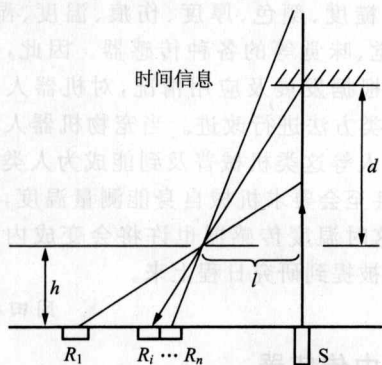


图 1.4 光学式接近传感器的原理

超声波测距传感器的原理是:向被测物体发射数十千赫频率的超声波,物体的反射音量与距离的平方成反比,而传输时间与距离成正比。超声波的特性与光的不同,它在介质中呈现放射状传输,因此它容易受到外界因素的影响,但是在光波大幅度衰减的水中,超声波传感器却可以大显其能,这种传感器广泛应用于移动机器人的壁面检测和目标、障碍物的测量等方面(参阅1.3.5节)。

角度传感器属于外传感器,它的输入量为转轴的角位移、重力场的方向、加速度方向、物体姿态等信息,可以将一维、二维、三维角位移分别解释为倾斜、方向、姿态。具体地讲,倾斜角传感器测量二维平面内相对于基准线或基准方向的角位移。方向传感器测量三维空间中某一点相对于基准点的张角,姿

态传感器测量指向某点的方向和绕该方向轴旋转的旋转角。无论是上述哪一种,都有旋转型、振子型和振动型之分,与电位计的原理类似。

重力方向传感器中的重锤相当于质点,在牛顿力(质量 \times 加速度)的作用下移动,输入信号就是该移动方向(一般是重力加速度和运动加速度的合成方向)。支撑重锤的方法有万向节型和球内转动球型两种。图1.5所示为万向节式结构,将重锤悬架在远离内部环的旋转轴之处,利用磁场或光学方法检测自由移动的重锤的方向^[12]。球内转动球型将球形重锤封闭在球形容器内,用光学方法检测重锤的滚动方向^[13]。

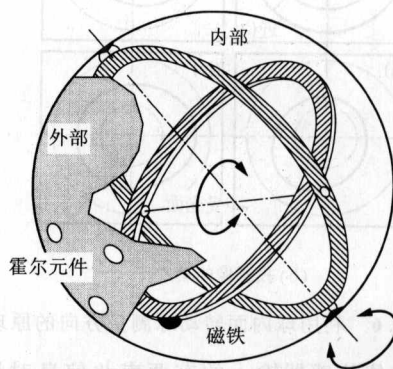


图 1.5 万向节结构的方向传感器

以后者为例说明其检测原理。图1.6(a)中的球形容器由透明玻璃制成,转动的球重锤作为光照射的标靶,重锤投影一般为椭圆形(图1.6(b))。不过重锤最接近发光元件,而在远处形成一个一个的同心圆。根据椭圆长轴的倾角或长度,以及椭圆中心位置到受光面中心的距离等数据就能确定方向。

基于万向节结构的机械式传感器不仅可以检测重力方向,还可以检测任意方向。机械式陀螺仪就是这种传感器,它安装在万向节的内侧环上,始终保持高速旋转。如果旋转体的转轴上始终受到保持力的作用,即使万向节支架的姿态发生变化,转轴的方向也不会改变,而万向节的环之间能产生相对角位移,角位移的测量结果可以直接分解成姿态的三个参数,这就是陀螺仪的检测原理。不过,光纤陀螺仪是根据激光在细长纤维中的传播速度或相位随加速度的变化而改变的的原理研制出来的。

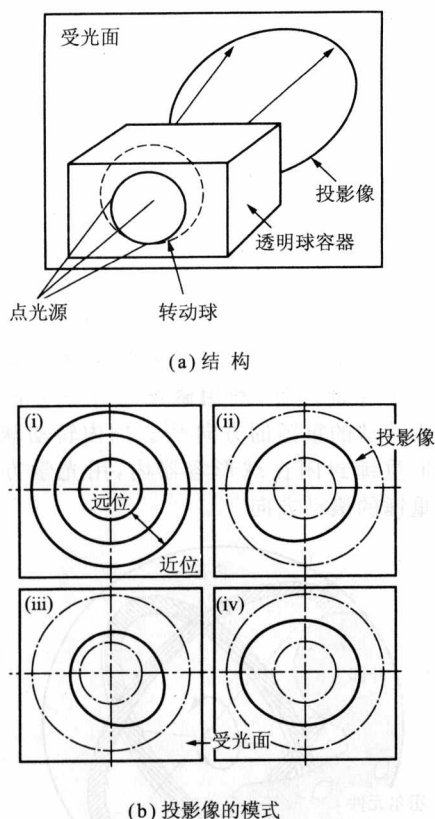


图 1.6 利用球内面转动球测量方向的原理

方位传感器输入的东西南北信息对机器人导航很有帮助。大多数方位传感器的原理都是利用地球的磁场,是一种观测磁针运动的技术。为了从三维移动物体上获得方位信息,也有采用让磁针漂浮在容器液面上的传感器^[14]。一般来说,这些磁针不过只表示肉眼可见的方位。有人提出一种能在黑暗环境下使用的传感器结构,它把磁针换成细长永久磁铁,让细长磁铁在球容器里浮动,再借助于容器外部的霍尔元件取出磁通变化,以电信号的形式把磁针朝向提取出来。

近年来,还出现了更加方便地应用的姿态传感器,它被做成带状光纤传感器。其基本原理是光纤的弯曲会引起光传播量的增减^[15](图 1.7)。把长长的带状光纤分割成若干个区间,在每个区间内放入光纤束,比较不同光纤之间的反射光量就能得知各个区间内的弯曲或扭曲量。进一步从根部到端部将各个区间的变形量串联起来,就能输入传感器整体的姿态。显然,这种传感器的光学信号处理相当复杂。基于相同原理也可以简化传

感器的结构,例如,只是把光纤带从外部半固定地安装在动作部分,测量它的弯曲或扭曲。

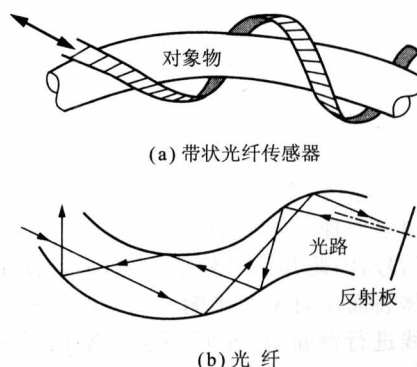


图 1.7 测量弯曲的形状传感器的原理

上述传感器的分类和检测原理都是最基本的,如果考虑到特殊用途,还有用于人机接口的语音感觉传感器,以及测量硬度、振动、表面粗糙度、颜色、厚度、伤痕、温度、湿度、烟、嗅觉、味觉等的各种传感器。因此,今后还可以根据发展及应用情况,对机器人传感器的分类方法进行改进。当宠物机器人或拟人机器人等这类机械普及到能成为人类的伙伴时,甚至会要求机械自身能测量温度,管理体温,这时温度传感器也许将会变成内传感器之一被提到研究日程上来。

冈田德次

1.2 内传感器

1.2.1 概述

在 JIS 有关工业机器人功能的名词术语中,将“内部测量功能”定义为测量机器人自身状态的功能^[1]。所谓的内传感器(internal sensor)就是实现该功能的元器件,具体来说检测对象包括关节的位移和转角等几何量、角速度和加速度等运动量,以及倾斜角、方位角、振动角等物理量,对各种传感器的要求是精度高、响应速度快、测量范围宽。

在内传感器中,位置传感器和速度传感器也称作伺服传感器^[2],是当今机器人反馈控制中不可缺少的元器件。通过对位置·速度数据进行一阶或二阶微分(或差分)得到速度、角速度或加速度、角加速度的数据,然后将它们代入运动方程式,这样的信号处理方法在机器人中被十分频繁地应用。高性能机

机器人常用另外一些信息处理的方法,如测量姿态角的陀螺仪、测量绝对位置的 GPS 等。它们也属于内传感器,不过其刚刚崭露头角,在小型化和高精度方面还有不少改进的余地。

下面分别介绍检测上述各种物理量的内传感器。实际上,从传感器本身的用途来说,有些外传感器也可以当作内传感器使用,如力觉传感器,在测量操作对象或障碍物的反作用力时,它是外传感器,如果把它用于末端执行器(end-effector)或手臂的自重补偿中,又可以认为它是内传感器。因此,有些内传感器的内容还可以参阅外传感器的相关章节。

1.2.2 位置·角度的检测

1. 设定位置和设定角度的检测

检测预先设定的位置或角度,可以用 ON/OFF 两个状态值,这种方法用于检测机器人的起始原点、极限位置,或者确定位置。

1) 微型开关

微型开关(micro switch)通常作为限位开关(limit switch)使用,当设定的位移或力作用到它的可动部分(称为执行器)时,开关的电气触点便断开或接通。它一般被装在壳体内,壳体对外力、水、油、尘埃起到一定的保护作用。它的检测精度为 $\pm 1\text{mm}$,图 1.8 表示执行器形状不同的几种微型开关^[3],有销键按钮式、压簧按钮式、片簧按钮式、铰链杠杆式和软杆式等,其中销键按钮式的精度最高,在机器人中应用的微型开关大都在开关执行器上安装滚轮。

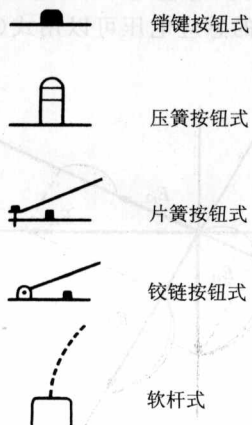


图 1.8 几种限位开关

2) 光电开关

光电开关(photo-interrupter)是由 LED 光源和光电二极管或光电三极管等光敏元件,相隔一定距离而构成的透光式开关(图 1.9)。当代表基准位置的遮光片通过光源和光敏元件之间的缝隙时,光线照射不到光敏元件上,于是产生开关作用。有些光电开关产品已经将接收一侧的输出部分和放大电路集成到一块芯片上直接输出 TTL 电平。光电开关的特点是非接触检测,因此其检测精度受到一定的限制。

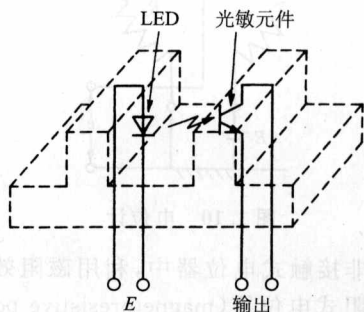


图 1.9 光电开关的结构

2. 位置和角度测量

测量机器人关节的直线位移和转角位移的传感器是在机器人位置反馈控制中必不可少的元器件。

1) 电位器

电位器(potentiometer)由环状或棒状的电阻丝和滑动片(或称为电刷)组成,滑动片接触或靠近电阻丝取出电信号,电刷与驱动器连成一体,将它的直线位移或转角位移转换成电阻的变化,在电路中以电压或电流变化的形式输出。图 1.10 是旋转式电位器的等效电路图,电阻值 R_1 、 R_2 由电刷的位置决定,输出电压为

$$e = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E \quad (1.1)$$

电位器可以分为滑片(接触)式和非接触式两大类,前者如导电塑料、线绕式、混合式等,后者如磁阻式、光标式等。

滑片式电位器以导电塑料电位器(conductive plastic potentiometer)为主,这种电位器将碳黑粉末和热硬化树脂涂抹在塑料的表面,并和接线端子制成一体,滑动部分加工得像镜面一样光滑,因此几乎没有磨损,寿命很

长。碳黑颗粒大小为 $0.01\mu\text{m}$ 数量级,因此它的分辨率极高。导电塑料的电阻温度系数是负值,但是由于整个电阻都是同一种材料制成的,因此输出电压仅由电阻的分压比决定,而无须担心温度的影响。线绕电位器(wirewound potentiometer)的结构有所不同,它的线性和稳定性最好,不过它的输出电压是离散值。

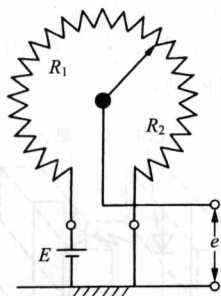


图 1.10 电位计

在非接触式电位器中,利用磁阻效应制成的磁阻式电位器(magnetoresistive potentiometer)已经达到实用,引起了人们的注意。所谓磁阻效应,是指在元件电流的垂直方向上施加外磁场,元件在电流方向上的电阻值将发生变化。在图 1.11 中两个 InSb 材料的磁阻元件 MR_1 、 MR_2 串联,两端加上电压,滑动永久磁铁材质的电刷,使磁场方向和磁阻元件的电流方向保持垂直,这时,磁阻元件的电阻值的变化正比于磁铁相对于元件位置的变化。输出电压也按式(1.1)的分压值给出。非接触式电位器具有寿命长、分辨率高、转矩小、响应快等优点。但磁阻元件的电阻温度系数比其他电阻大两个数量级,若将其直接用在电路中,输出电压的温度漂移会相当大。为此,一般在磁阻元件上串联固定电阻,通过电阻的平衡实现温度补偿。

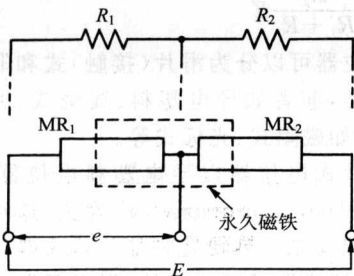


图 1.11 磁阻式电位器结构

2) 旋转变压器

旋转变压器(resolver)由铁心、两个定子线圈和两个转子线圈组成,是测量旋转角度的传感器。定子和转子由硅钢片和坡莫合金叠层制成,在槽内绕制成线圈,定子和转子分别由互相垂直的两相绕组构成。

为了说明旋转变压器的检测原理,图 1.12 给出内部接线电路图,在各个定子线圈上加交流电压,由于交流磁通的变化在转子线圈中产生感应电压,感应电压和励磁电压之间相关联的耦合系数是随转子转角的变化而改变的,因此根据测得的输出电压,就可以知道转角的大小。可以认为,旋转变压器是由随转角 θ 而改变且耦合系数为 $K\sin\theta$ 或 $K\cos\theta$ 的两个变压器构成的。

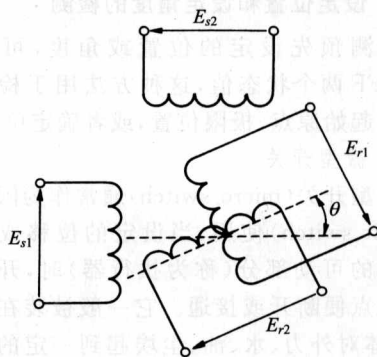


图 1.12 旋转变压器的原理

在两个线圈上分别加上 90° 相位差的两个励磁电压 E_{s1} 和 E_{s2} :

$$E_{s1} = E \cos \omega t, \quad E_{s2} = E \sin \omega t \quad (1.2)$$

如图 1.13 的向量图所示,各个励磁电压乘以耦合系数得到感应电压,经过向量合成后,转子线圈中的感应电压可以用式(1.3)和式(1.4)表示为

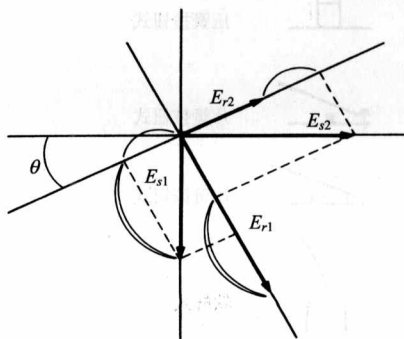


图 1.13 旋转变压器各线圈电压的向量图

$$\begin{aligned} E_{r1} &= K(E_{s1} \cos\theta - E_{s2} \sin\theta) \\ &= KE \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} E_{r2} &= K(E_{s2} \cos\theta - E_{s1} \sin\theta) \\ &= KE \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1.4)$$

可见,旋转变压器端输出是转子线圈相对于定子线圈空间转角 θ 的相位调制信号。 K 是两个线圈之间的最大耦合系数。

传统的旋转变压器曾经一度采用电刷或汇流环接触通电的方法在转子线圈中感应产生电压,但近年来大多采用无刷旋转变压器 (brushless resolver),即用铁心中带槽的旋转变压器或水银等液体接触的方式在转子线圈中感应产生电压。图 1.14 是无刷旋转变压器的结构图。有研究报告指出,用两极旋转变压器和多极旋转变压器进行组合,可以得到很高的检测分辨率^[4]。

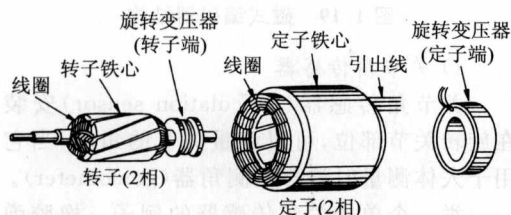


图 1.14 无刷旋转变压器结构

此外,有一种称为同步器 (synchro differential transmitter) 的角度传感器,它具有与电机相同的结构,有三相定子和三相转子。

3) 编码器

首先来解释脉冲发生器 (pulse generator) 和编码器 (encoder) 的区别。脉冲发生器只能检测单方向的位移或角速度,它输出与位移增量相对应的串行脉冲序列,而编码器则输出表示位移增量的编码脉冲信号,并带有符号。

根据刻度的形状,编码器分为测量直线位移的直线编码器 (linear encoder) 和测量旋转位移的旋转编码器 (rotary encoder)。根据信号的输出形式它们还可以分为增量式 (incremental) 编码器和绝对式 (absolute) 编码器。增量式编码器对应每个单位直线位移或单位角位移输出一个脉冲,绝对式编码器则从码盘上读出编码,检测绝对位置,图 1.15 是光学式旋转码盘的编码图。

根据检测原理,编码器可以分为光学式、磁式、感应式和电容式。下面介绍机器人中

应用最多的光学编码器和磁式编码器的原理。

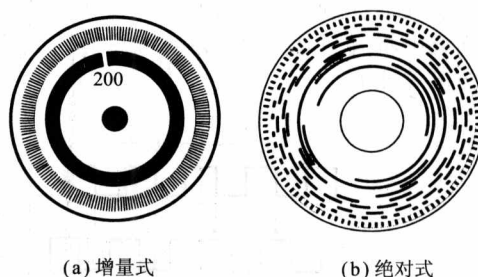


图 1.15 光学式旋转码盘的编码图

首先以旋转编码器为例说明光学编码器 (optical encoder) 的检测机构。图 1.16 示出这种编码器的结构,在带有明暗方格的码盘两侧,安放发光元件和光敏元件,随着码盘的旋转,光敏元件接收的光通量随方格间隔的变化同步发生变化。光敏元件输出的波形经过整形后变成脉冲。根据脉冲计数,可以知道固定在码盘上的转轴的角位移,码盘上有 Z 相标志信号,每转一圈输出一个脉冲。此外,为了判断旋转方向,并得到提高系统分辨率所需的插补信号,码盘还可提供相位差为 90° 的 A 相和 B 相两路输出。如图 1.17 所示, A, B 两相信号中,当 A 相信号上升时,观测 B 相信号的电平,就可以根据哪个信号的相位超前来判断码盘的旋转方向。将 A, B 两相信号进行异或运算 (XOR) 就得到频率为原信号频率 2 倍的脉冲信号 C,进而将 C 和 \bar{C} 上升的触发信号 C_T 和 \bar{C}_T 再进行异或运算 (XOR),又可得到频率扩大 2 倍的脉冲序列 D。这样,可以用电学的手段进一步提高物理角度的分辨

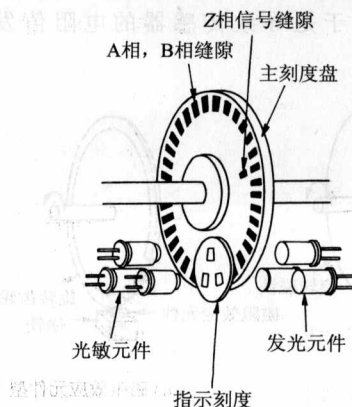


图 1.16 光学旋转编码器的结构

率。最近,用光反射的方法代替码盘上的缝隙,已经制造出小型且分辨率极高的旋转编码器,并已经得到实际应用^[5],但要想在机器人领域中将其付诸应用,必须考虑是否具有耐冲击等性能。

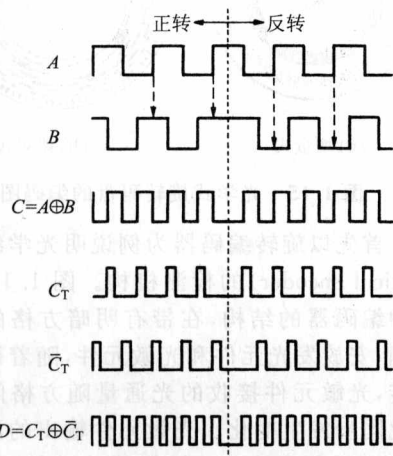
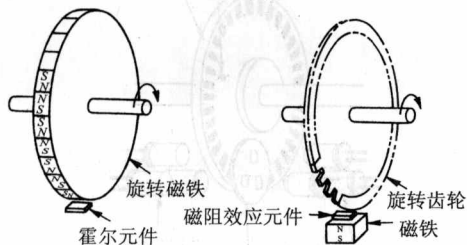


图 1.17 码盘 A 相和 B 相的信号处理

区别磁式脉冲发生器和磁式编码器的方法,与上述光学式的方法相同。磁式脉冲发生器的结构如图 1.18 所示,用 InSb、GaAs 等半导体材料制成的霍尔元件,能产生与磁通密度成正比的输出电压。如图 1.18(a)所示,将多个磁铁的两极交互配置组成旋转磁铁标尺,在其旁边放置的霍尔元件可以检测出标尺转动时磁通密度的变化。在图 1.18(b)中,用 InSb 等半导体或坡莫合金等强磁性薄膜制成的磁阻效应元件(参阅本节“电位器”部分内容)充当磁传感器,当旋转齿轮的齿靠近时,磁通增加;反之,齿轮远离时,空隙增大,磁通减少,于是导致传感器的电阻值发生变化。



(a) 霍尔元件型

(b) 磁阻效应元件型

图 1.18 磁式脉冲发生器的原理

磁式编码器(magnetic encoder)是通过在强磁性材料表面上等间隔地记录磁化刻度标尺,在标尺旁边相对放置磁阻效应元件或霍尔元件,检测出磁通的变化。图 1.19 是采用磁阻效应元件的编码器结构图。两个磁传感器的距离恰好是磁化标尺刻度间隔的 1/4,于是可以根据输出信号的相位关系检测旋转方向。与光编码器相比,磁式编码器的刻度间隔大,但它具有耐油污、抗冲击等特点。

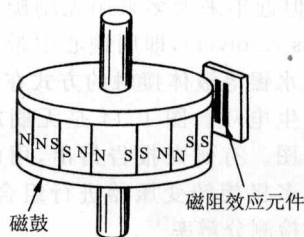


图 1.19 磁式编码器结构

4) 关节角传感器

关节角传感器(articulation sensor)安装在旋转关节部位,可以测量关节的角度,当它用于人体测量时被称作测角器(goniometer)。

举一个单轴关节传感器的例子。橡胶弹性梁随关节动作可以产生弯曲变形,导致粘贴在梁结构表面的导电橡胶的电阻发生改变,于是关节的弯曲转换成电阻的变化被检测出来。图 1.20 给出其结构和原理^[6]。长度为 l ,厚度为 b 的导电橡胶贴在厚度为 c 的梁上,如果梁两端的 A、B 弯成 θ 角,测量部分整体橡胶的伸缩量为 Δl_1 、 Δl_2 ,它与 A、B 之间的变形方式无关,那么 Δl_1 、 Δl_2 可由下式求出:

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 = \frac{(b+c)\theta}{2} \quad (1.5)$$

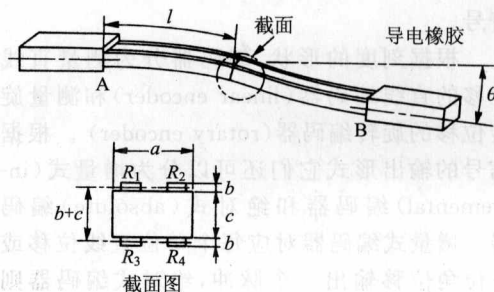


图 1.20 人体测角器

代表伸缩量的电阻值的变化可以由电桥电路测出,于是可以求出角位移 θ 。导电橡胶

的滞后现象对输出线性度的影响为4%，可见这种传感器在精度方面还有改善的余地。不过，这种传感器的结构简单，即使旋转中心角的固定不是很准确，也能测量出关节角，因此有望在人工指关节等方面得到应用。除了导电橡胶之外，还有利用板簧和应变片组装关节传感器的方案。

1.2.3 速度和角速度的测量

速度和角速度的测量是在驱动器的速度反馈控制中必不可少的环节，有时也利用1.2.2节2.中所述的位移传感器测量速度，即测量单位采样时间的位移量，然后用F/V转换器变成模拟电压。下面介绍与位移传感器不同的速度、角速度传感器。

· 测速发电机

测速发电机(tachometer generator, 或称为转速计传感器(tachogenerator), 比率发电机(rate generator), 下面称为测速发电机)是基于发电机原理的速度传感器或角速度传感器。

如果线圈在恒定磁场中发生位移，那么线圈两端的感应电压 E 与线圈内交变磁通 ϕ 的变化速率成正比，输出电压为

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.6)$$

这就是测速发电机测量角速度的原理，它又可以按结构再细分为直流测速发电机、交流测速发电机和感应式交流测速发电机。

直流测速发电机(DC tachogenerator)的定子是永久磁铁，转子是线圈绕组。图1.21示出直流测速发电机的结构。它的原理和永久磁铁的直流发电机相同，转子产生的电压通过换向器和电刷以直流电压的形式输出，可以测量0~10 000r/min的旋转速度，线性度为0.1%。它的优点是停机时不产生残留电压，因此最适宜用作速度传感器。它有两个缺点：一是电刷部分属于机械接触，对维修的要求高；另一个是换向器在切换时产生的脉动电压会导致测量精度降低。因此，现在也有无刷直流测速发电机。

永久磁铁式交流测速发电机(AC induction tachogenerator)的构造和直流测速发电机恰好相反，它在转子上安装多磁极永久磁铁，定子线圈输出与旋转速度成正比的交流电压。

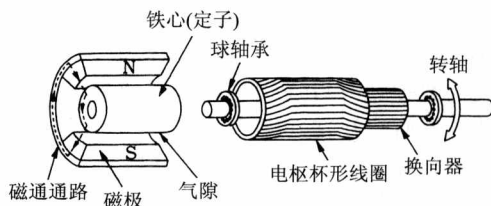


图 1.21 直流测速发电机的结构

二相交流测速发电机是交流感应测速发电机中的一种，其原理如图1.22所示。它的转子由铜、铝等导体构成，定子由相互分离的、空间位置成90°的励磁线圈和输出线圈组成。在励磁线圈上施加一定频率的交流电压产生磁场，使转子在磁场中旋转产生涡流，而涡流产生的磁通又反过来使交流磁场发生偏转，于是合成的交链磁通在输出线圈中感应出与转子旋转速度成正比的电压。

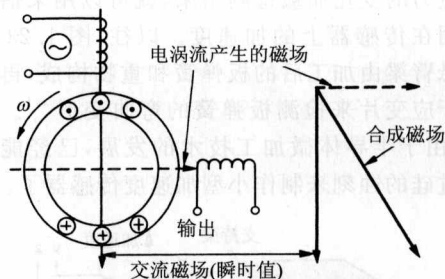


图 1.22 交流感应测速发电机原理

1.2.4 加速度和角加速度的测量

随着机器人的高速化、高精度化的发展，如何克服由机械运动部分刚性不足引起的振动问题开始提到日程上来^[7]。作为抑制振动问题的对策，有时在机器人的各个构件上安装加速度传感器(accelerometer)测量振动加速度，并把它反馈到构件底部的驱动器上^[8]；有时把加速度传感器安装在机器人的手爪部位，将测得的加速度进行数值积分，然后加到反馈环节中^[9]，以改善机器人的性能。目前，人们已经开发了同时检测三个轴方向的加速度传感器^[10,11]，例如，将它安装在移动机器人本体上，伴随着移动机器人的运动，对加速度传感器所得到的时间序列信号进行积分，可以获得速度和位移信息。同样，在虚拟现实和人机交互领域，把加速度传感器直接安装在人体的各个部位，就可以在比较短的时间

内提取出相应部位的速度和位移信息。譬如,由于图像传感器瞬间锁存的缘故,有些运动轨迹数据就可以通过加速度传感器数据的插补计算而被补充进来^[12]。

根据检测原理,加速度传感器大体上分为检测伴随加速度的质量一方的运动位移的类型和检测伴随压电元件加速度运动的共振频率变化的类型。

1. 质量片+支持梁型的加速度传感器

首先来说明悬臂梁振动型加速度传感器的工作原理。如图 1.23(a)所示^[13],一端固定、一端支持质量片的悬臂梁构成的加速度传感器向上运动时即产生加速度,作用在质量片上的惯性力导致梁支持部分的位移及梁的内应力的产生。于是,梁支持部位的位移变换成图 1.23 中的上下电极之间间隙长度的变化或内部应力的变化而被检测出来,就可以用来估计作用在传感器上的加速度。以往,图 1.23 中的悬臂梁由加工后的板弹簧和重物构成,再借助于应变片来检测板弹簧的弯曲变形^[14]。最近,由于半导体微加工技术的发展,已经能够通过硅的蚀刻来制作小型加速度传感器了。

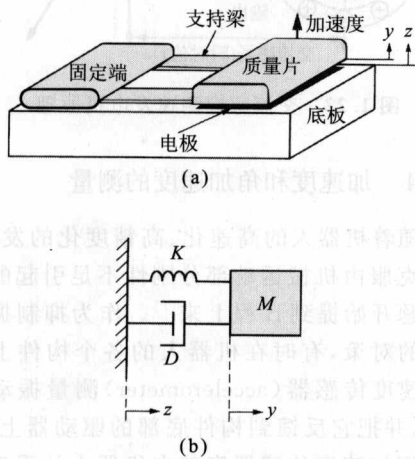


图 1.23 悬臂梁结构的加速度传感器

在图 1.23 中,直接根据质量片和电极之间的间隙组成的电容的变化^[15],或者间接地把悬臂梁内部的应力变化转化为压电电阻的变化^[16],就可以分别计算出位移 $x(t)$ 。从定量上讲,如果设梁的弯曲刚度为 K ,质量片的质量为 M ,造成该质量片运动特性损失的黏性系数为 D ,则该加速度传感器如图 1.23(b)所示,可以将系统表达为质量片相对于电极

的相对位移 $x \equiv z - y$,呈现二次延滞的特性。若将输入即加速度信号 $a(t)$ 为时间 t 的函数,输出即质量片的位移信号为 $x(t)$,对它们进行拉氏变换: $L[a(t)] = A(s)$, $L[x(t)] = X(s)$,于是对应于输入加速度 $a(t)$ 的输出位移 $x(t)$ 的传递函数 $H(s)$ 就表示为

$$H(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{K}{M}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_r}{Q}s + \omega_r^2} \quad (1.7)$$

式中, $\omega_r \equiv \sqrt{K/M}$, $Q \equiv \sqrt{KM}/D$ 分别为固有振动频率和机械阻尼。

根据式(1.7)可以求出加速度传感器的静态灵敏度 α 为

$$\alpha \equiv H(s=0) = \frac{M}{K} = \frac{1}{\omega_r^2} \quad (1.8)$$

可见,随固有振动频率的下降,加速度传感器的灵敏度将上升。

2. 质量片位移伺服型加速度传感器

质量片位移伺服型加速度传感器就是检测 1. 中梁所支持的质量片的位移。例如,通过相应的静电势进行反馈,使质量片返回到位移为零的状态。这种传感器结构,由于不存在质量片的几何位移,所以比 1. 中所讲的传感器的加速度测量范围更大。

设在质量片中产生的惯性力 F_a 与加速度 a 成正比,消除由此引起的质量片位移的控制力为 F_s 。再假设 1. 中对应于静电电容变化 ΔC ,质量片的位移为 Δd ,如果这时得到与 Δd 成正比的输出电压 V_o ,根据式(1.8),在稳定状态下,由 $\Delta d = (M/K)a = F_a/K$,可求得

$$V_o = \beta \Delta d = \beta \frac{F_s - F_a}{K} \quad (1.9)$$

式中, β 为比例常数。于是,通过比例增益 γ 调节 V_o 所得到的反馈信号为

$$F_s = \frac{C_o}{2d_o} (\gamma V_o)^2 \quad (1.10)$$

这样就可以计算所产生的 F_s 。式(1.10)中, C_o 是在初始状态下电极之间的间隙 d_o 时所对应的电容^[17]。

3. 压电加速度传感器

压电加速度传感器(piezoelectric acceleration sensor)利用具有压电效应的材料,它在

受到外力时发生机械形变,并将产生加速度的力转换为电压(反之,若外加电压也能产生机械变形)。压电元件大多数由高介电系数的钛(锆)酸铅($\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$)系材料制成。

若压电常数为 d_{ij} (i, j 分别表示压电元件的极化方向和变形方向),加在元件上的应力 F 和产生电荷 Q 的关系可表示为

$$Q = d_{ij} F \quad (1.11)$$

设压电元件的电容为 C_p ,输出电压为 V ,则有

$$V = \frac{Q}{C_p} = \frac{d_{ij} F}{C_p} \quad (1.12)$$

显然, V 和 F 在很大动态范围内保持线性关系。

压电元件的变形有三种基本模式:压缩变形、剪切变形和弯曲变形。图 1.24 表示变形方向^[18],图 1.25 给出基于剪切模式的加速度传感器的结构。传感器中一对平板形或圆筒形的压电元件被垂直固定在轴对称的位置上,压电元件的剪切压电常数大于压缩压电常数,而且不受横向加速度的影响,在一定的高温下仍然能保持稳定的输出。

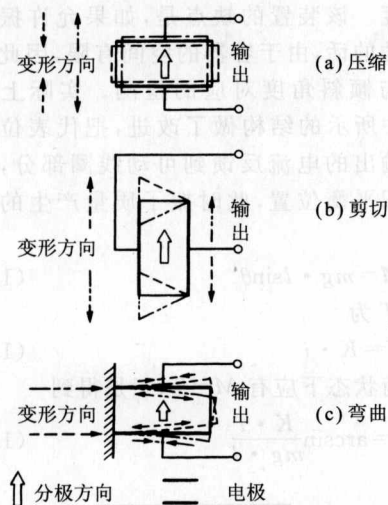


图 1.24 压电元件的变形模式

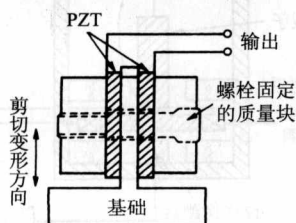


图 1.25 剪切式压电加速度传感器

1.2.5 姿态角的检测

姿态传感器(posture sensor)就是能够检测重力方向或姿态角变化(角速度)的传感器,因此它通常用于移动机器人的姿态控制等方面。根据检测原理可以将其分为陀螺式和垂直振子式等。

1. 陀螺式

陀螺传感器(gyroscope sensor)是检测随物体转动而产生的角速度的传感器,即使没有安装在转动轴上,它也能检测物体的转动角速度^[19,20],因此它可以用于移动机器人的姿态,以及转轴不固定的转动物体的角速度检测。陀螺式传感器大体上有速率陀螺仪、位移陀螺仪、方向陀螺仪等几种,在机器人领域中大都使用速率陀螺仪(rate gyroscope)。根据具体的检测方法又可以将其分为机械转动型、振动型、气体型及光学型等。下面,首先介绍振动陀螺仪的检测原理,由于利用了微机械加工技术,它具有小型、处理方便、价格低廉、精度高等特点。然后,也顺带介绍一下昂贵且精度高的光学陀螺仪的检测原理。

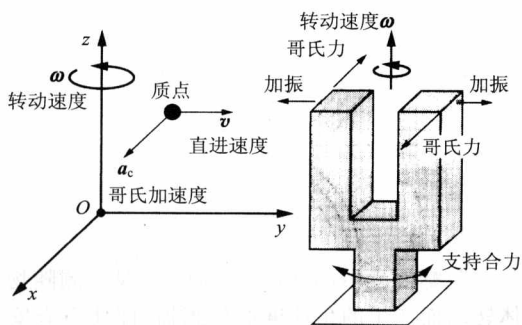
1) 振动陀螺仪

振动陀螺仪(vibratory gyroscope)是指给振动中的物体施加恒定的转速,利用哥氏(Coriolis)力作用于物体的现象来检测转速的传感器。哥氏力 f_c 是质量 m 的质点同时具有速度 v 和角速度 ω ,相对于惯性参考系运动时所产生的惯性力,如图 1.26(a)所示,惯性力作用在对应于物体的两个运动方向的垂直方向上,该方向即为图 1.26(a)所示的哥氏加速度 a_c 的方向,它的大小为

$$f_c = ma_c = 2mv \times \omega \quad (1.13)$$

我们以图 1.26(b)所示的音叉型振动子为例,进一步说明利用陀螺仪的哥氏力检测转速的原理。在图 1.26(b)中,设定与图 1.26(a)中产生哥氏力的原理相同的姿态坐标系。这时,假设让音叉的两根振子相互沿 y 轴进行振动,于是在 z 轴方向引起转动速度,音叉左侧的分叉沿 $-x$ 方向、而右侧的分叉沿 $+x$ 方向产生哥氏力。无论是直接检测哥氏力,或者是检测它们的合力作用在音叉根部向左转动的力矩,均能检测出转动的角速度 ω 。之所以将音叉设计为两个分叉是由于此方法可以

消除音叉加速度的影响。



(a) 哥氏加速度 (b) 作用在音叉振子上的哥氏力

图 1.26 检测哥氏力的转速陀螺仪

2) 光纤陀螺仪

另一种具有高精度特征姿态的传感器就是光纤陀螺仪(optical gyroscope),下面介绍它的测量原理。光纤陀螺仪的工作原理是基于 Sagnac 效应^[21]的。在图 1.27 所示的环状光通路中,来自光源的光经过光束分离器被分成两束,在同一个环状光路中,一束向左转动,另一束向右转动进行传播。这时,如果系统整体相对于惯性空间以角速度 ω 转动,显然,光束沿环状光路左转一圈所花费的时间和右转一圈是不同的。这就是所谓的 Sagnac

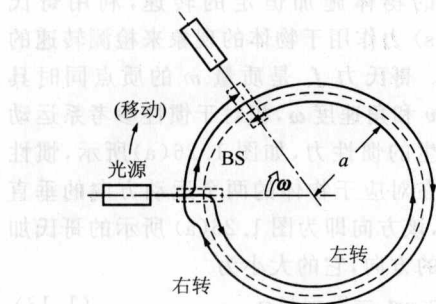


图 1.27 Sagnac 效应

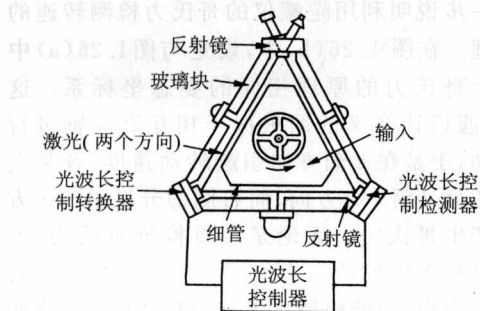


图 1.28 环状陀螺仪的结构

效应,人们已经利用这个效应开发了测量转速的装置,图 1.28 就是其中的一例。

该装置的结构是共振频率 Δf 振动的两个方向的激光在等腰三角形玻璃块内通过反射镜传递波束。如果玻璃块围绕与光路垂直的轴以角速度 ω 转动时,左右转动的两束传播光波将出现光路长度差,导致频率上的差别。让两个方向的光发生干涉,该频率差就呈现出干涉条纹。这时有

$$\Delta f = \frac{4S\omega}{\lambda L} \quad (1.14)$$

式中, S 为光路包围的面积; λ 为激光的波长; L 为光路长度。

2. 垂直振子式

图 1.29 介绍的是垂直振子式何服倾斜角传感器(pendulum type inclination sensor)的原理。振子由挠性薄片支撑,即使传感器处于倾斜状态振子也能保持铅直姿态,为此振子将离开平衡位置。通过检测振子是否偏离了平衡点,或者检测由偏离角函数(通常是正弦函数)所给出的信号,就可以求出输入倾斜角度。该装置的缺点是,如果允许振子自由摆动的话,由于容器的空间有限,因此不能进行与倾斜角度对应的检测。实际上对图 1.29 中所示的结构做了改进,把代表位移函数所输出的电流反馈到可动线圈部分,让振子返回平衡位置,此时振子质量产生的力矩 M 为

$$M = mg \cdot l \sin \theta \quad (1.15)$$

转矩 T 为

$$T = K \cdot i \quad (1.16)$$

在平衡状态下应有 $M = T$, 于是得到

$$\theta = \arcsin \frac{K \cdot i}{mg \cdot l} \quad (1.17)$$

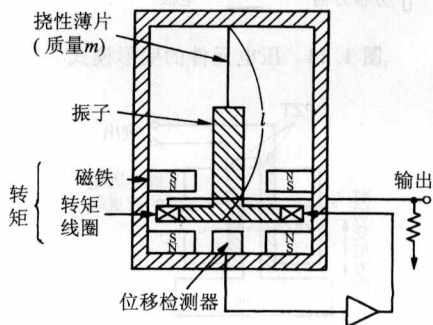


图 1.29 垂直振子式何服倾斜角传感器

这样,根据测出的线圈电流 i ,即可求出倾斜角 θ ,并克服了上述装置测量范围小的缺点。

1.2.6 固定坐标位置和绝对坐标的位置检测

1. 固定坐标位置

虚拟现实领域等非常需要在固定坐标系中的三维几何建模技术(例如,对人体或一部分建模)。这实际上就是通过立体视觉捕捉安装在人体上的光学标记,或者利用光纤关节位移传感器对目标部位的三维位置进行测量。

首先,立体视觉捕捉人体三维位置的方法已经实用化了。它是一种在测量对象的多个部位安装色标,用两台以上的彩色摄像机进行各个颜色的色标辨识,再基于三角测量原理,测量各个色标的三维位置的方法。另外一种方法是在对象部位安装 LED,使用两台以上的 PSD 摄像机顺序地捕捉被点亮的 LED 信息,再基于三角测量原理计算三维位置。

2. GPS

GPS 是“Global Positioning System”的字母的缩写,即全球定位系统,它能连续、独立和精确地求出随时间变化的飞机、火箭等各种物体在地球上的任何位置。同时,也可以计算出移动物体的速度和运动方向,因此它很适合作为机器人领域,特别是测量移动机器人绝对位置的方法。

关于 GPS 的测量原理和应用,将在第 4 篇 6.1.3 节中加以详细说明。

山田阳滋

1.3 外传感器

1.3.1 视觉传感器

1. 生物视觉传感器与其功能

1) 生物视觉的进化

动物的眼睛多种多样,最原始的是单细胞生物眼虫,它在鞭毛的前部有感光器官。生物只是在进化成多细胞生物后才出现形状上像眼睛的视觉器官。例如,涡虫就具有一对与原始单孔照相机似的眼睛^[1]。

在人类等脊椎动物以及墨鱼、章鱼等的眼睛里有透镜,不过它是经历了相当久远的

进化过程才形成的。透镜出现后,有了聚光的效率及聚焦的功能,可以获得更清晰的图像。

另外,昆虫和蛇都具有复眼,它的结构将在后面进行说明,这些动物通过复眼扩大视野,得到二维图像。随着进化过程的演进,生物视觉传感器的构造变得相当复杂。

2) 人类的视觉传感器

人类眼球的构造如图 1.30 所示^[2],整个眼球的直径约 24mm,外来光线通过角膜→眼房水→瞳孔→晶状体→玻璃状体到达视网膜,在视网膜上成像。像人类这样栖息在陆地上的脊椎动物,光从空气中进入角膜时,会产生大的折射,因此需要靠晶状体来调整光线的折射,以便正确地聚焦成像。

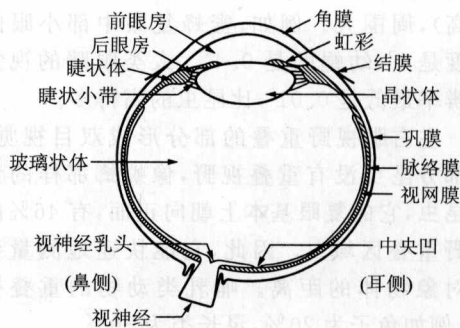


图 1.30 人类眼球的构造^[2]

改变瞳孔的大小可以调节入射光量,瞳孔的最小尺寸(缩瞳)为直径 1mm,最大(散瞳)为约 8mm,即对光的调节能力只有 64 倍。外界光量的变化范围为 100 万倍左右,所以只靠瞳孔不足以调节光量,还需要借助于视觉细胞适应明暗的变化。

在视网膜中有锥体(cone)和杆体(rod)两种类型的视觉细胞(光接受器),在这里光被变换为电信号,它们经过某种类型的细胞后,再通过视网膜的输出细胞,即神经细胞最终被送至大脑^[3]。锥体能在光线明亮的地方进行颜色分辨和形态视觉处理,相反,杆体则担负着在光线昏暗的地方观察明暗的任务。锥体的数目约为 700 万个,集中于视网膜中心。杆体则相反,大都分布在视网膜的周边。

3) 昆虫视觉传感器

昆虫的视觉大约在 7 亿年前与脊椎动物的分离,后来其独自继续进化。与人类眼睛相同的是,昆虫的视觉也是它们为了适应生

存环境而进行最优化的结果。昆虫的主要视觉(复眼)构造如图 1.31 所示^[4]。

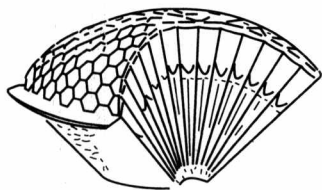


图 1.31 昆虫复眼的构造^[4]

复眼由若干个小眼集合而成。例如，幼蝶的复眼有 16 000 个小眼，蜜蜂有 5000 个小眼，而苍蝇也有 800 多个小眼。

在复眼中，小眼彼此之间的角度是决定其空间分辨率的主要因素。小眼之间的角度随复眼部位的不同而各异，复眼中部小(分辨率高)，周围大。例如，蜜蜂复眼中部小眼的角度是 1° ，幼蝇的是 0.4° 。人类眼睛的视觉分辨率最低是 0.01° ，比昆虫的高得多。

左右眼视野重叠的部分形成双目视觉。大部分昆虫没有重叠视野，像螳螂那样的食肉昆虫，它的复眼基本上朝向正面，有 46% 的视野重叠区域^[4]。因此，它能快速地测量到与对象物体的距离。哺乳类动物的重叠视野，例如兔子为 20%，灵长类为 80%。

关于复眼的时间分辨率，如快速飞行的蜜蜂为 200~300Hz，蜻蜓为 170Hz，苍蝇为 140Hz，缓慢行走的独角蟹为 30Hz，蚂蚁低于 40Hz，而人类眼睛则是 30~40Hz，因此人眼的时间分辨率与低速昆虫的时间分辨率基本相同。

至于色觉，人类的可视波长为 400~800nm，昆虫的如蜜蜂的为 300~650nm，因此它能感受到紫外线。

4) 视觉信息的处理

自古以来，人类就一直探索着视网膜接受光线图式的信息处理机理。这项研究涉及对生物体脑部活动的监控技术，经常采用的方法有：对猴子等高级动物施加光刺激，取出脑部的电信号，研究信号与光刺激之间的关系。

视网膜的输出是通过外侧膝状体被传递到后头叶的视野中。现在人们已经掌握在视野中除了进行方位、波长、运动方向、两眼视差等的基本计算之外，还存在一些区域能实现与动态形状、色彩等相关的形状分析和动

作分析^[3,5,6]。

目前有关高级视觉的研究还不够充分。虽然对大脑的功能定域性已经有了基本的认识，但是在神经即脑细胞水平这一级上尚无对定域性得出的结论。据报道，在猴子的实验中已证实存在着对手产生反应或对脸部产生反应的神经。

最近，由于 PET(阳离子放射断层摄影装置)被开发出来，使人们对生物体脑部活动的研究有了可能^[7]。因此，未来人类对视觉信息处理机理的了解会更进一步深入。

2. 光接收装置及各种摄像机

1) 光电二极管与光电转换器件

图 1.32(a)是 pn 型光电二极管(photo diode)的结构。如果让光子射入半导体的 pn 结边界耗尽层，就会激励起新的空穴。利用电场将空穴和电子分离到两侧，就可以得到与光子量成比例的反向电流。pn 型元件的优点是暗电流小，所以被广泛用于照度计、分光度计等测量装置中。

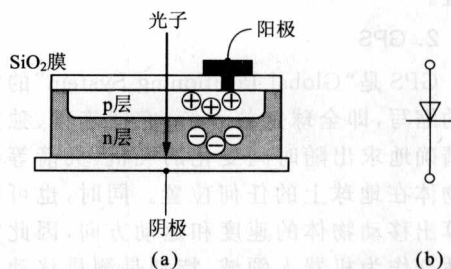


图 1.32 pn 型光电二极管的结构

在高速响应的发光二极管中有 pin 结型与雪崩型^[8]。前者是在 pn 结边界插入一个本征半导体 i 层取代其耗尽层。给它施加反向偏压，可以减少结电容，获得高速响应；而后者是在 pn 结上加 100V 左右的反向偏置电压产生强电场，能激励载流子加速，与原子相撞产生电子雪崩现象。这些高速型二极管的响应很快，能用于高速光通信等。

光电晶体管(photo transistor)就是经过晶体管把光电二极管的输出放大的结构。

2) PSD

PSD (Position Sensitive Detector, 位置敏感探测器)是测定入射光位置的传感器，由发光二极管、表面电阻膜、电极组成^[9]。入射光产生的光电流通过电阻膜到达元件两端的电

极,流入各个电极的电流与电阻值存在对应关系,而电阻值又与光的入射位置以及到各个电极的距离成比例,因此根据电流值就能检测光入射的位置。PSD元件中有一维和二维两种,它们都具有高速性,但是要注意入射到开口部分的散射光的影响。

3) CCD 图像传感器

电荷耦合器件(CCD: Charge Coupled Device)图像传感器是由多个光电二极管传送储存电荷的装置。它有多 MOS(Metal Oxide Semiconductor 金属-氧化物-半导体)结构的电极,电荷传送的方式是通过向其中一个电极上施加与众不同的电压,产生所谓的势阱,并顺序变更势阱来实现的。根据传送电荷需要的脉冲信号的个数,施加电压的方法有二相方式和三相方式。

CCD 图像传感器有一维形式的,是将发光二极管和电荷传送部分一维排列制成的。此外还有二维形式的,它可以代替传统的硒化镉光导摄像管和氧化铅光电摄像管二维传感器。二维传感器属于水平和垂直传递电荷的传感器,传送方式有行间传送(interline transfer)、帧-行间传送(frame interline transfer)、帧传送(frame transfer)及全帧传送(full frame transfer)四种方式。

图 1.33 所示为行间传送的方式,采取一维摄像区域(接收部分)与传送区域平行布置结构的方法。接收部分多使用二极管。每一帧曝光所储蓄的电荷分别被垂直或水平地传送,然后以图像信号的形式被取出。在 CCD 内部电荷传送的效率非常高,因此其具有高的灵敏度。由于整个传送区域是被遮光的,所以在传送中不会被曝光。

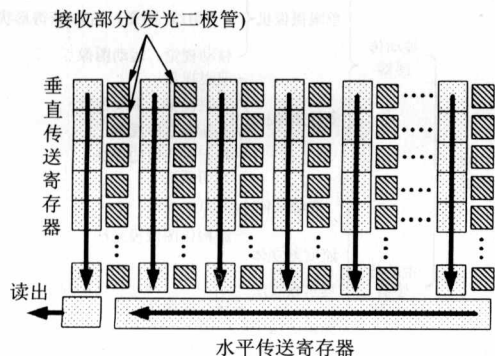


图 1.33 CCD 摄像器件的结构

CCD 图像传感器把垂直寄存器用作单画面图像的缓存,所以可以将曝光时间和信号传送时间分离开。也就是说,它具有所有像素能在同一时间内曝光的特点。

4) CMOS 图像传感器

CMOS 图像传感器^[10]是由接收部分(二极管)和放大部分组成的一个个单元,然后按照二维排列。由于放大器单元之间特性的分散性大,以致其噪声比较大。不过,近年来噪声消除电路的性能已得到改善,故使 CMOS 图像传感器得到迅速普及和应用。

CMOS 传感器的优点是耗电低,并且利用一般的半导体制造技术就可以完成 CMOS 处理器的设计和加工,这都有利于图像处理电路和图像传感器的单片化和低成本化^[11,12]。

5) 其他的摄像元件

光电子倍增管就是根据二次放电效应增大入射光的元件,因此它可以用来检测微弱光线,如用于夜间监视摄像机等。此外,它还可以用于分析仪器或 X 射线照相等场合。

在红外线^[13]图像方面有波长为 $2 \sim 15 \mu\text{m}$ 的中红外和远红外区域的传感器,在红外线检测器中得到较多使用的是 HgCdTe 和 Al-GaAs 结晶的量子型传感器。热效应型传感器最近也被实用化了,它的原理是把装置接收的入射红外线变换为热能,再利用温度检测器将温度升高转变为电信号输出。热效应型图像传感器无须冷却器,这是量子型图像传感器所不及的优点。

3. 功能性视觉传感器

1) 人工视网膜传感器

模仿人类的视网膜信息处理功能的图像传感器如图 1.34 所示,这种人工视网膜芯片^[14,15]已经付诸使用。人工视网膜芯片是由像素阵列、控制扫描器、输出电路组成。各个像素根据给定的 -1、0、+1 三种灵敏度状态控制信号受控,各自对应负、零、正灵敏度,属于灵敏度可调光敏元件(VSPC: Variable Sensitivity Photodetection Cell)。因此,可以利用适当的控制规则,实现边缘增强、光滑、模式匹配、一维摄影等图像处理运算。

与 CCD 相比,人工视网膜传感器不仅图形处理功能强,而且具有灵活、快速、耗电低、成本低等特点,因此它被广泛应用于游戏机、

数字摄像机及安全等领域^[16,17]。

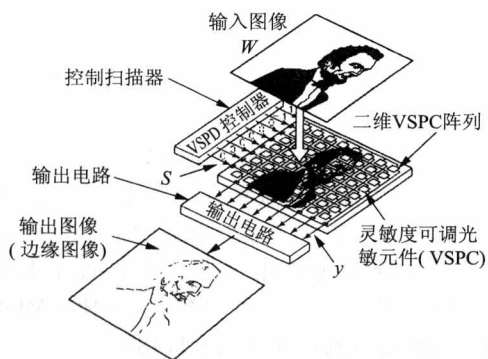


图 1.34 人工视网膜传感器的结构^[16]

2) 超高速数字视觉芯片

人们正在研究包含图像处理功能在内的超高速数字视觉芯片^[18,19]，它已经超出以往以处理摄像信号为主的传统图像处理的界限。在图 1.35 中，在二维平面内排列的光电检测元件阵列的信息被送入制作在同一芯片上的并联通用处理单元(PE)内，由于是实施完全并行的处理，因而不受摄像信号速率的限制，能完成高速处理。目前，人们正在试制 64×64 像素的芯片，它能在 1ms 的帧速率内同时跟踪 18 个物体的轨迹^[20]。

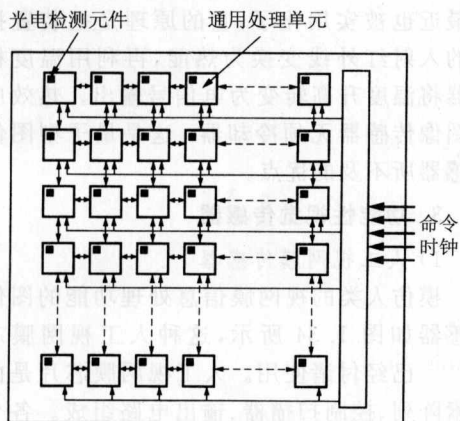


图 1.35 超高速数字视觉芯片

3) 时间调制图像传感器^[21,22]

这种图像传感器的每一个像素都把光检测器生成的入射光量，以及它与全体像素共同参照信号的时间相关值并行储存起来，然后类似于图像传感器那样输出。如果设像素 (i,j) 的光检测器的输出是 $f_{i,j}(t)$ ，外部电信号为 $g(t)$ ，扫描周期一致的积分时间为 T ，那

么时间相关型图像传感器的输出为

$$\phi_{i,j}(t) = \int_{t-T}^t f_{i,j}(t) g(t) dt$$

图 1.36 示出了时间调制型图像传感器的结构示意。由于将高带宽的光检测器与乘法器结合，故 $f(t)$ 和 $g(t)$ 不受扫描周期的限制。在进行调制后，各个像素生成带宽很窄的信号，故可以按照低的扫描周期输出。

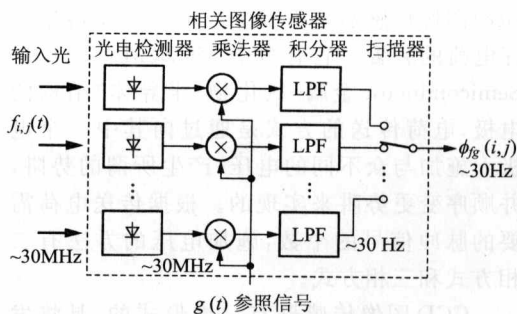


图 1.36 时间调制型图像传感器

时间调制型图像传感器的应用主要在振动模态测量、图像特征提取、立体测量、可变分光光谱摄像等方面^[22]。例如，放置在环境光中的物体在高频调制光的照射下，将调制光线进行适当的时间延迟后作为参考信号，就能消除环境光的影响，拍摄出仅由调制光照明的物体图像。

4. 三维视觉传感器

1) 三维视觉传感器的分类

三维视觉传感器的分类如图 1.37 所示。它可以分为被动传感器(用摄像机等对目标物体进行摄影，获得图像信号)和主动传感器(借助于传感器向目标物体投射光图像，再接收返回信号，测量距离)两大类。

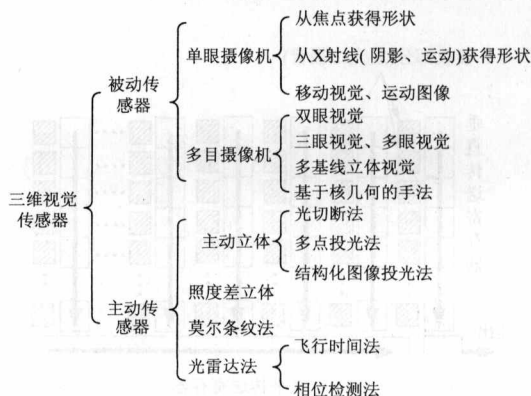


图 1.37 三维视觉传感器的分类

2) 被动视觉传感器

(1) 单眼视觉 采用单个摄像机的被动视觉传感器有两种方法:一种方法是测量视野内各点在透镜聚焦的位置,以推算出透镜和物体之间的距离;另一种方法是移动摄像机,拍摄到对象物体的多个图像,求出各个点的移动量再设法复原形状。

(2) 立体视觉 双眼立体视觉^[23]是被动视觉传感器中最常用的方式。在图 1.38 中,左右两个摄像机给物体拍照,然后对任意点 P 在图像上的位置做图像处理,得到 α 、 β 。如果此时已知两个摄像机的相对关系(L),就可以计算出 P 的三维位置(三角测量原理)。增大摄像机之间的间隔,能提高纵深测量精度,不过这是以减少两个摄像机的公共视野为代价的。可见这种方法随观察角度的不同,有时适应性会较差。于是,有人提出利用三个摄像机的三眼视觉^[24]和由不同基线长度的多个摄像机组合成的多基线立体视觉^[25]方法。

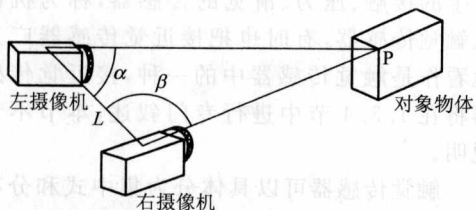


图 1.38 立体视觉传感器

3) 主动视觉传感器

(1) 光切断法 光切断法的原理如图 1.39 所示。光切断法即把双眼立体视觉中的一个摄像机改变为狭缝投光光源的方法。然后从水平扫描狭缝光得到的镜面角度,以及图像提取的狭缝像的位置关系,按照与立体视觉相同的三角测量原理就可以计算和测量出视野内各个点的距离。

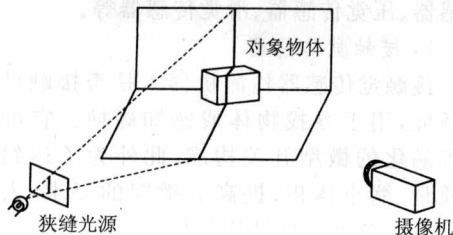


图 1.39 光切断法

(2) 空间编码测距仪 在光切断法中要

想获得整个画面的距离分布信息,必须取得多幅狭缝图像,这样做相当花费时间。要解决这个问题,可以将其改为多个狭缝光线同时投光的办法,不过此时需要对图像中的多个狭缝图像加以识别。也就是说,可以给各个狭缝编排适当的代码 ID,作为 ID 的编排方法有把多条狭缝光线随机切断后再投光的方法^[26],以及利用颜色信息识别多个狭缝的方法^[27]。

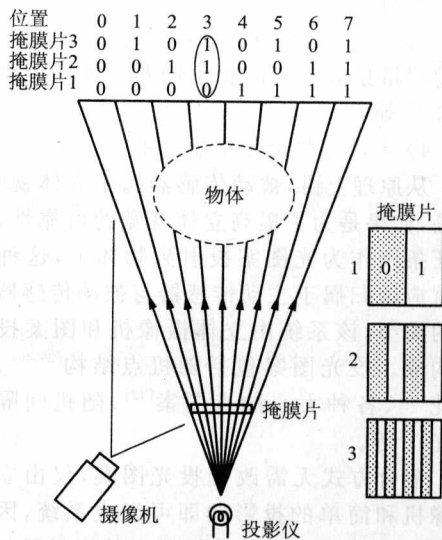


图 1.40 空间编码测距仪的原理

已经实现实用化的空间编码测距仪^[28,29],它的原理是给狭缝图像附加有效 ID。如图 1.40 所示,利用掩膜片依次向对象物体投射多个编码图案光束,而编码的特点是让各个像素值按照一定的规律成时间序列变化。例如,在图 1.40 中,以[0 0 1]编码的区域的位置是 3。在已知几何位置的投影仪中,空间编码与各个狭缝像的投射角度是一一对应的,所以根据三角测量法就可以计算出到物体的距离。对于编码图案来说,采用相邻编码之间的代码间距为 1 的交替二进制符号,这样可以使符号边界导致的误差最小。另外一个措施是在每个编码投射黑白交替的相补图形,这样取得的图像差分值就可以用来减少对象物体表面反射率和光散射的影响。图案投光的装置采用电灯和液晶闪光灯^[28]组合,或者激光和多角形镜面的组合^[29]。

在基于三角测量原理的主动测距仪中还有几种其他方式,如同时投射多个点光源^[30,31]

的方式和投射多个正弦图案的方式^[32]。

(3) 莫尔条纹法 莫尔条纹法 (Moiré fringe) 就是投射多个狭缝形成的条纹, 然后在另一个位置上透过同样形状的条纹进行观察, 通过对条纹间隔或图像中条纹的倾斜等进行分析, 可以复原物体表面的凹凸形状^[33~35]。

(4) 激光测距法 它是一种投射激光等的高定向性光线, 然后通过接收返回光线, 测量距离的方式^[36]。其中, 有计算从光线发送到返回的飞行时间的方法^[37]和投射调制光线通过测量接收光线的相位偏差来推算距离的方法^[38]等。

4) 主动与被动传感器混用

从原理上讲, 被动传感器属于立体视觉, 但是, 如果是为了提高立体视觉的可靠性, 将特征条纹作为光图案投射到物体上, 这种方式就应该归属于主动传感器与被动传感器混用的类型, 该系统由立体摄像机和图案投光器构成。投光图案包括随机点结构^[39,40]、条状花^[41]、各种大小的点图案^[42]、随机间隔缝隙光^[43]等。

混合方式无需改变投光图案, 仅由立体摄像机和简单的投影器即可组成系统, 因此作为工业机器人及移动机器人的视觉已经达到实用化。

桥本 学 实森彰郎

1.3.2 触觉传感器

1. 概述

触觉传感器是具有人体皮肤感觉功能的传感器的总称。人体皮肤有几种感觉接收器, 能感觉多种刺激。图 1.41 是人体皮肤神经末梢的结构图^[44], 皮肤由表皮、真皮和皮下组织三层构成, 真皮、表皮和皮下组织里有帕西尼氏小体、美克耳氏触觉细胞、麦斯纳氏小体和自由末梢, 通过上述构造神经末梢感受外界对皮肤的刺激。

在生理学领域内, 把触觉系统感受到的感觉分为压觉、接触觉、温度觉和痛觉等。这些感觉分别和特定的神经末梢有联系, 例如, 帕西尼氏小体与压觉有关, 自由末梢与痛觉有关。但是, 目前对人体皮肤的多种感觉, 大部分尚未解释清楚。还有一种学说, 认为在外界刺激下, 兴奋的感觉接受器群体输出信

号的模式不同, 因此产生各种不同的感觉(感觉模式学说)。



图 1.41 皮肤的神经末梢

机器人触觉传感器不可能实现人体全部的触觉功能。人类对机器人触觉的研究只能集中在扩展机器人能力所必需的触觉功能上。一般地, 把检测感知和外部直接接触而产生的接触、压力、滑觉的传感器, 称为机器人触觉传感器, 有时也把接近觉传感器广义地看作是触觉传感器中的一种, 接近觉传感器将在 1.3.4 节中进行专门叙述, 本节不予说明。

触觉传感器可以具体分为集中式和分布式(或阵列式)。前者用单个传感器检测各种信息, 后者则检测分布在表面上的力或位移, 并通过对多个输出信号模式的解释而得到各种信息。触觉传感器一般多指分布式传感器, 下面介绍几种具有代表性的集中式和分布式触觉传感器的结构。

2. 集中式传感器

集中式传感器在利用触觉检测的复杂信息中, 有其特定的目的。它的特点是功能单一, 结构简单。按种类可以将其分为接触觉传感器、压觉传感器、滑觉传感器等。

1) 接触觉传感器

接触觉传感器检测机器人是否接触目标或环境, 用于寻找物体或感知碰撞。它可以由商品化的微型开关构成, 此外为了达到减轻质量、缩小体积、提高灵敏度的要求, 人们还设计了各种其他结构的传感器。

如图 1.42 所示^[45], 无论哪种类型的接触觉传感器均由弹性元件、导电触点、绝缘体构

成。图 1.42(a) 中的例子由导电性石墨化碳纤维、氨基甲酸乙酯泡沫、印制电路板和金属销构成,碳纤维被压后与金属触点接触,触点由断开变成接通,由此得到接触信息^[46]。图 1.42(b) 中的传感器是由弹性体海绵、导电橡胶和金属触点构成的。导电橡胶受压后,海绵变形,导电橡胶和金属触点接触,从而取得接触信息。图 1.42(c) 传感器中的一对触点由金属和覆盖它的导电橡胶构成,二者之间有缝隙。导电橡胶受压变形后,与金属接触,触点闭合。图 1.42(d) 中传感器的须状导电橡胶与物体接触变形,与金属接触,触点闭合。图 1.42(e) 是 push off 式传感器^[47]。金属销被弹簧挤压,与印制板上的导电部分接触,触点处于常闭状态。如果物体和金属销相碰,金属销被压,触点断开,由此得到接触信号。

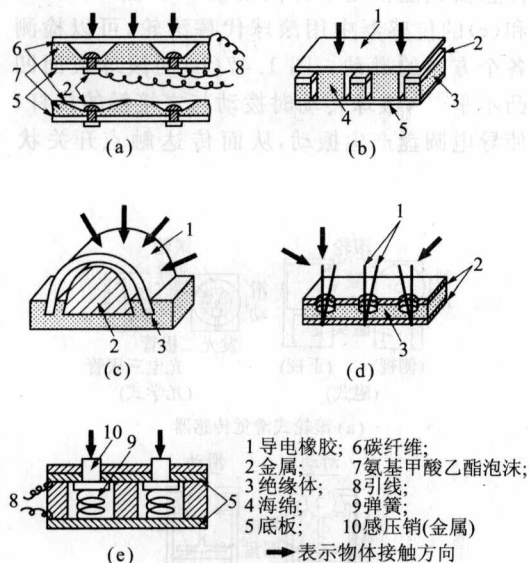


图 1.42 接触觉传感器

2) 压觉传感器

压觉传感器可以检测传感器表面上受到的作用力,它一般由弹性体与检测弹性体位移的敏感元件或感压电阻元件构成。通常用弹簧、海绵等材料制作弹性体,用电位器、光电元件、霍尔元件^[47,48]等作为位移检测机构。图 1.43 给出了一个用弹簧和电位器制成的传感器,它用弹簧支撑的平板作为机械手部的物体夹持面。往平板上加负载,平板就发生位移,该位移量由电位器检测出,如果已

知弹簧的刚性系数,则可以根据位移计的输出求出出力的大小。

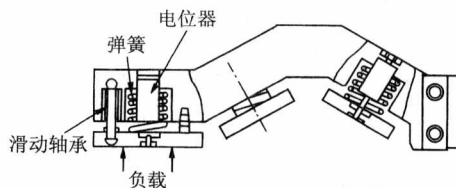


图 1.43 采用弹簧和电位器的压觉传感器

采用感压电阻元件的传感器有许多种设计方案,如将机器人的某一部分设计成柔性结构,贴上应变片,或者在硅橡胶中掺入碳粉之类的导电粉末,制成感压导电橡胶,或者采用压阻元件、压电聚合物等。

图 1.44 是一个采用应变片的压觉传感器。这种传感器根据所用弹性体结构的不同,有各种不同的形式,图 1.44 中的机械手指由左右各一个 I 型梁构成,可以检测夹紧力或加在手指上的约束力^[49]。

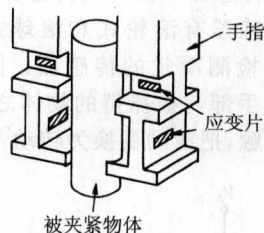


图 1.44 采用应变片的压觉传感器

如果感压导电橡胶被压缩,橡胶中导电粉末的密度发生变化,电阻减小。如图 1.45(a) 所示,导电橡胶夹在两个电极之间构成传感器,其电阻变化可以通过电压测量出来。图 1.45(b) 是用压阻元件(硅膜片)制成的传感器^[50]。传感器被弹性薄片覆盖着,受外力作用时,硅片上的硅膜片通过支柱而受压,当应力增大时,硅膜片的电阻发生变化,该电阻的变化通过与硅膜片相接的电桥测出来,从而测出外力的大小。利用半导体蚀刻技术可以将这种传感器小型化。目前,有人正在开发 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的元件,以及按 3×3 阵列布置的压觉传感器^[51]。这种传感器的缺点是无法将其做成适应各种物体形状的柔性结构。

强极性基聚合物放在强电场中取向极化,可以成为压电材料。有人提出用这种材

料中的聚氟乙烯(PVDF, PVF_2)制作压觉传感器^[50]。图1.45(c)是用约 $70\mu\text{m}$ 厚的 PVF_2 薄膜制作的传感器^[52]。 PVF_2 薄膜被用绝缘胶粘在排列着电极的底板上,薄膜上的铝镀层作为共用电极,弹性体盖在电极上面充当受压面。当表面受到压力时, PVF_2 薄膜受压产生的电荷可以由电容结合电路检测出来。压电聚合物在外力 F 的作用下产生电荷 q ,电流和外力的关系为 $i=k(\text{d}F/\text{d}t)$ (k 为常数)。因此,欲求力 F ,必须对电流或电压进行积分。这一点导致它的处理电路与压阻式压觉传感器有所不同。还有一点,就是 PVF_2 薄膜不但感受垂直方向的应力,而且受到切向力作用时也会有电荷产生,为了区分这两种力,就要在结构上想办法,即必须设法限制外力的方向。

3) 滑觉传感器

机器人中的“滑动”是指机器人手部与对象物的接触点产生相对位移,检测这个位移或速度的传感器叫做滑觉传感器。

滑觉传感器有滚轮式和滚球式,还有一种通过振动检测滑觉的传感器。图1.46所示的机器人手部与被抓持的物体之间通过滚球或滚子接触,把滑动变换为转动^[53]。

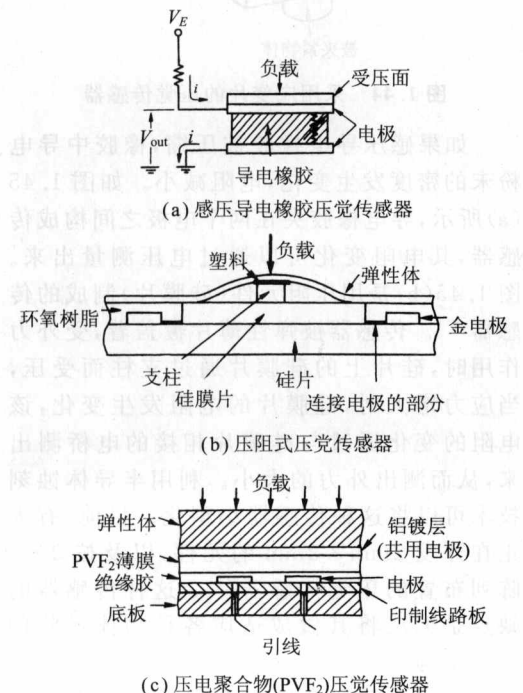


图 1.45 压觉传感器

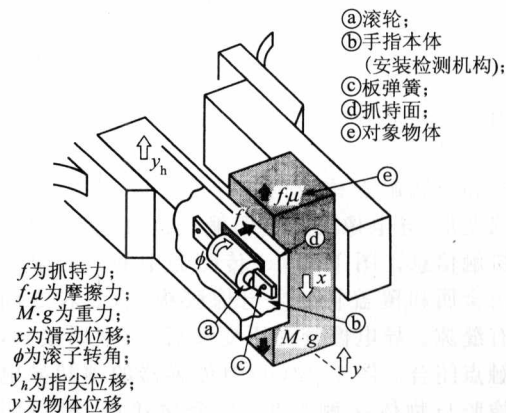


图 1.46 滑觉传感器的概念

图1.47是该滑觉传感器的典型结构。在图1.47(a)中,物体滑动引起滚轮转动,用磁铁、静止磁头、光传感器等进行检测,这种传感器只能检测单方向滑动^[54]。图1.47(b)和(c)的传感器中用滚球代替滚轮,可以检测各个方向的滑动。图1.47(b)的滚球表面凹凸不平^[55],滚球转动时拨动与之接触的杠杆,使导电圆盘产生振动,从而传达触点开关状态

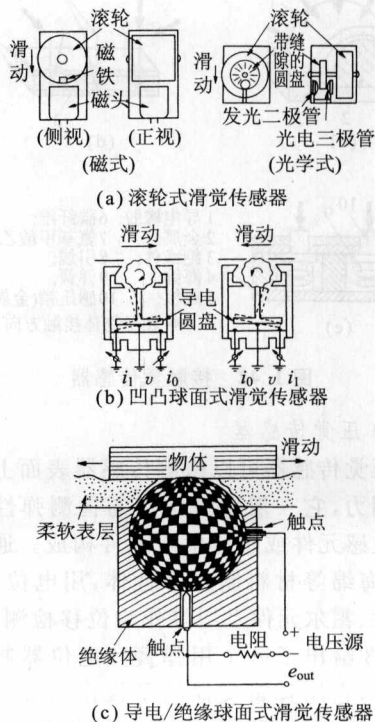


图 1.47 滑觉传感器

态的信息。图 1.47(c) 的滚球表面有黑白相间的图形, 黑色为导电部分, 白色为绝缘部分^[56]。有两个电极和球面接触, 随着球面的滚动, 检测两个电极之间的导通状态的变化, 就可以知道滚球的转动, 即感知滑动。比如, 计算机的鼠标也使用 2 轴滑觉传感器^[57]。

图 1.48 是振动式滑觉传感器^[58], 传感器表面伸出的触针能和物体接触。对象物体滑动时, 触针与物体接触产生振动, 这个振动由压电传感器或磁场线圈结构的微小位移计进行检测。

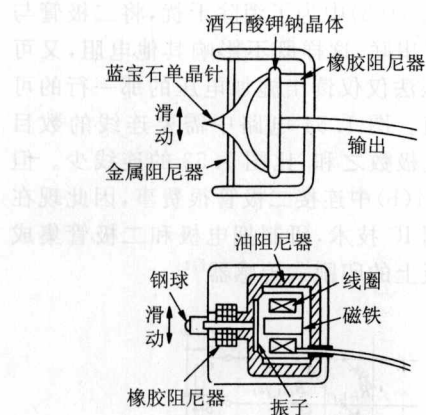


图 1.48 振动式滑觉传感器

此外还提出了利用本节 4. 中列举的三维触觉传感器测量垂直于抓持方向的剪切力, 根据剪切力的变化来推测滑觉的方案。

3. 分布式(阵列式)传感器

分布式传感器可以检测分布在面状物体上的力或位移, 其基本结构与上述的压觉传感器类似。由于它输出的是传感器面上各个点的信息, 因此其结构比集中式传感器更为复杂。目前面临的任务是开发高空间分辨率、能检测面上各点压力的密集型分布式传感器, 在各种研制方案中, 采用导电橡胶的最多, 其次是采用光和磁阻元件等。

1) 导电橡胶分布式传感器

(1) 传感器的结构 在硅中掺入铝粉或碳粉等导电粉末, 使其硬化后制成所谓的硅橡胶, 根据掺入粉末比例的不同, 硅橡胶或者成为低电阻导体, 或者成为电阻随外力变化的感压电阻。为了叙述方便, 我们约定把低电阻橡胶称为导电橡胶, 把电阻可变的橡胶称为感压导电橡胶。

感压导电橡胶分布式传感器的基本结构如图 1.49 所示^[59]。感压导电橡胶薄片夹在互相垂直的一对梳形电极之间, 通过测量电阻的变化来检测上下电极之间交点间的变形。图 1.50 是图 1.49 的等效电路图, 此外还有其他几种电极的排列方法。图 1.51 称为窗形分布式传感器。如果在外力作用下, 橡胶发生变形, 就可以检测出窗框状的共用电极和各个窗口的电极之间的电阻改变^[60]。这种方法仅适合在橡胶薄片的单面上构成电极的场合, 图 1.52 是其等效电路图。

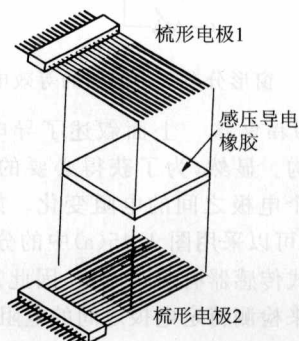


图 1.49 感压导电橡胶分布式传感器的基本结构

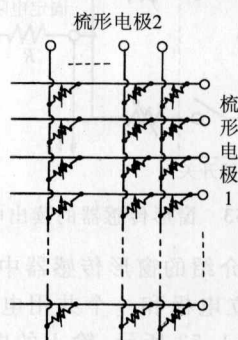


图 1.50 感压导电橡胶分布式传感器的等效电路图

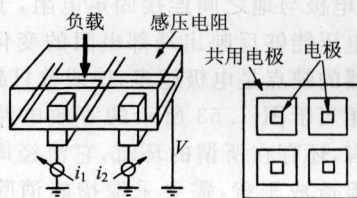


图 1.51 窗形分布式传感器

导电橡胶分布式传感器的原理是利用接触电阻的变化。例如, 让导电橡胶棒与金属电极互相交叉, 或者让导电橡胶通过绝缘体

的网状片与电极接触时,在外力的作用下橡胶发生变形,使金属与橡胶之间的接触面积增大,导致其接触电阻变化。因此,若能通过流过金属—橡胶之间的电流把接触电阻的变化作为电压进行检测,就可以求出外力的大小^[60,61]。

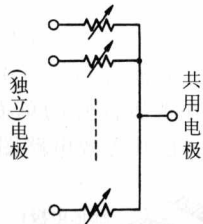


图 1.52 窗形分布式传感器的等效电路图

(2) 扫描电路 上面叙述了导电橡胶传感器的结构。显然,为了获得必要的信息,必须检测两个电极之间的电阻变化。如果仅有一对电极,可以采用图 1.45(a)中的分压电路,但是分布式传感器有多对电极,因此需要各种扫描电路来检测特定电极之间的电阻变化。

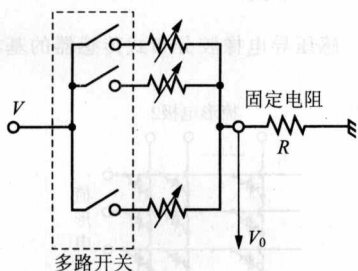


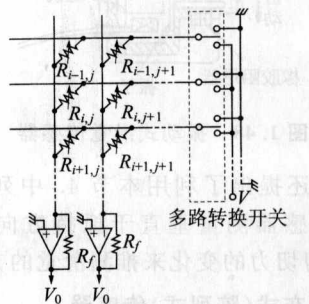
图 1.53 窗形传感器的读出电路

前面 1) 介绍的窗形传感器中,检测部分由若干个独立电极和一个共用电极组成(图 1.51)。如图 1.53 所示,输入的电压信号经过多路转换开关依次加到各个独立的电极上,共用电极与地之间连接固定电阻,于是通过输出电压能够反映出局部电阻的变化。这种传感器的缺点是电极越多,连线数目越多。

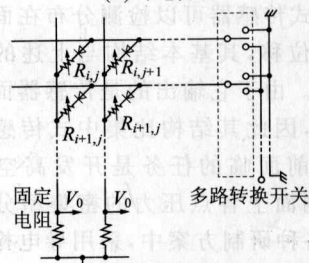
对相当于图 1.53 所示的等效电路的传感器而言,还存在所谓的环流,它流经周边的各个电阻造成干扰,需要采取措施消除这种干扰,以便正确读取局部电阻的变化值。图 1.54 中介绍了两种常用的方法。图 1.54(a)中,在一组电极上连接运算放大器,在另一组电极上施加输入电压。电压经多路转换开关切换,每次输入电压 V 只加到一个电极上,其

余电极均接地。运算放大器连接电阻 $R_{i,j}$ 和 R_f 构成反相放大器。如图 1.54 所示,若运算放大器的十端接地,由工作原理可知,一端的电位为零。由电路图可见,接地行中各个接触电阻 R_x 两端的电压均为零。这样,只有施加输入电压 V 的那一行的电阻中才有电流流过,各个运算放大器的输出为 $V_0 = -(R_f/R_{i,j})V$,其中包含了各个接触电阻 $R_{i,j}$ ($i=1, \dots, l, j=1, \dots, m$) 的信息,从 V_0 中可以测出各个 R_{ij} 的变化。这种读出电阻值的方法叫做零电位法。

图 1.54(b)中为了消除干扰,将二极管与可变电阻串联,这样既不影响其他电阻,又可以用分压法仅仅读出施加电压的那一行的可变电阻值。图 1.54 电路中需要连线的数目是两组电极数之和,比图 1.53 的连线少。但是图 1.54(b)中连接二极管很费事,因此现在正在利用 IC 技术,研制把电极和二极管集成到电路板上的印刷式传感器^[62]。



(a) 零电位法



(b) 串联二极管法

图 1.54 扫描电路

2) 磁阻变化分布式传感器

图 1.55 是磁阻变化型分布式传感器的结构图^[63]。在 Al_2O_3 基底上蚀刻出矩阵排列的“<”形坡莫合金(81-19Ni-Fe, 50Ω),各行之间用金引线连接,上面覆盖一层 0.0225mm 厚的橡胶膜,橡胶膜上面是一层蚀刻着 $60\mu\text{m}$

宽的带状铜线聚酯薄膜,带状铜线覆盖住“ \angle ”形坡莫合金各列的上方。聚酯薄膜上面装有橡胶层作为感压面。当感压面受到压力时,0.0225mm厚的橡胶膜产生微小的压缩变形,使坡莫合金和铜线之间的距离发生变化,它可以通过磁阻变化检测出来。方法如图1.55所示,在坡莫合金上输入稳定的方波电压,在各条铜线上依次输入脉冲电压,由于坡莫合金受到由铜线产生的、随两者距离变化的磁场的影响,其中的电流将发生变化。把电流转换成电压信号后,经多路开关输出。根据这个原理试制的传感器,在密度为25mm \times 25mm内可达到64点阵,最高灵敏度为40N/m。

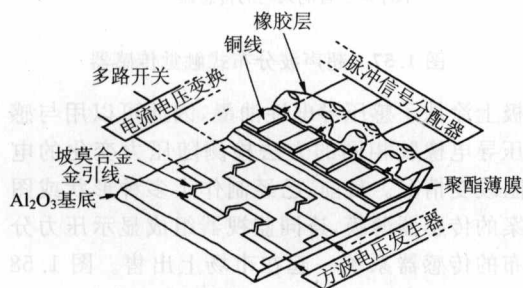


图 1.55 磁阻变化型分布式传感器

3) 光电元件分布式传感器

最近利用光电元件的分布式传感器特别引人注目。以 CCD 为代表的各种小型光电元件的陆续问世,使压力-力信号可以通过某种手段转换成光信号,这样就有可能制成高密度的传感器。

图 1.56 所示为几种光电元件做成的传感器。图 1.56(a)中,将橡胶垫(感压面)和弹性触杆做成一体结构,当接触物体时,触杆产生位移,遮挡发光元件和光敏元件之间的光路。于是光敏元件接收的光量随外力的变化而变化,并以电信号的形式被检测出来^[64]。采用这种原理的传感器市场上已有出售,元件的间隔为1.8mm,成10 \times 16点阵排列。图1.56(b)和(c)是光纤传感器。图1.56(b)传感器具有蜂窝结构的硬质材料框架,上面覆盖着弹性体,弹性体的里面涂有反光颜色。在框架上的各个孔中装有条光纤,分别用于传送光源的发射光和反射光。一旦弹性体受到压力后产生变形,光纤前端和弹性体内

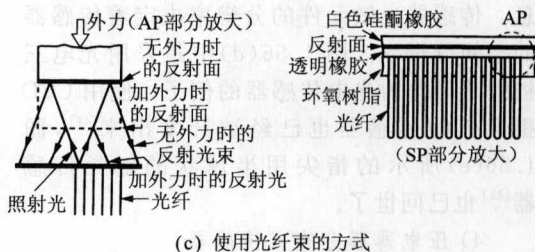
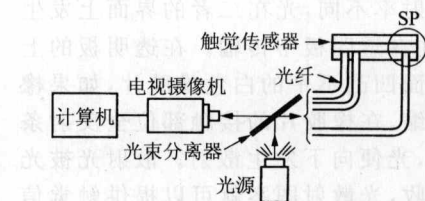
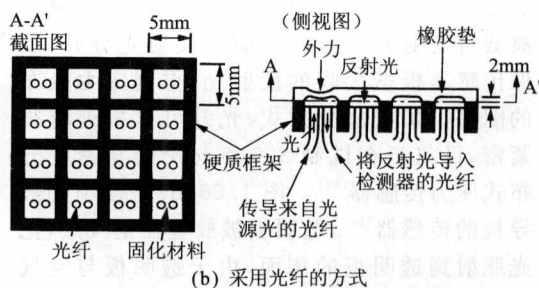
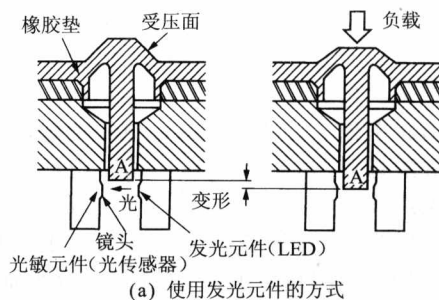


图 1.56 使用光电元件做成的分布型传感器

表面的间隔就会发生变化,于是弹性体内表面上的反射光量发生改变,该变化量经光纤被传到图像传感器上,能反映受接触压力部分的形状图像^[65]。图 1.56(c)中的传感器由白色硅酮橡胶、透明橡胶和环氧树脂粘接的光纤束组成。如图 1.56(c)所示,光纤传输光源的发射光,当硅酮橡胶表面受力产生变形后,反射面(硅酮橡胶和透明橡胶的分界面)靠近光纤前端,导致反射光量增大。光束分离器将发射光和橡胶界面的反射光分开,图像传感器根据接收的反射光,得到压力分布的图像。采用这种方式,光纤可以排列得很紧密,目前正在试制 300 点/cm² 的高密度分布式压力传感器^[50]。图 1.56(d)是使用光波导板的传感器^[66],透明板被放置在空气中,把光照射到透明板的侧面,由于透明板与空气对光的折射率不同,光在二者的界面上发生全反射,并在透明板中传输。在透明板的上方敷设底面凹凸不平的白色橡胶片,如果橡胶片被压缩,在橡胶片的接触部位全反射条件被破坏,光便向下发生散射。散射光被光传感器接收,光散射图案就可以提供触觉信息。传感器光敏元件的分辨率决定着传感器的空间分辨率。图 1.56(d)中是采用光电三极管阵列作为光电传感器的例子。使用 CCD 摄像机的传感器也已经被开发出来^[67],图 1.56(e)所示的指尖用半球状的触觉传感器^[68]也已问世了。

4) 压电薄膜分布式传感器

将本节 2 中 2) 所讲述的压电薄膜(PVDF)压觉传感器排列成阵列就可以作为分布型触觉传感器使用。合理利用压电元件的特性,传感器就可以有效地提取接触状况的变化信息^[69]。

5) 超声波分布式传感器

图 1.57(a)把超声波发送器和接收器排成阵列,就能检测它们与充当皮肤的人造橡胶表面之间的超声波反射状况,感知接触表面的变形^[70]。图 1.57(b)的原理则是让弹性体空腔内的空气产生音响共鸣,利用共鸣频率的变化检测空腔的变形^[71]。

6) 导电油墨分布式传感器

如图 1.58(a)所示,在双面聚对苯二甲酸乙二酯(PET)上相向排列银电极导线,由于电

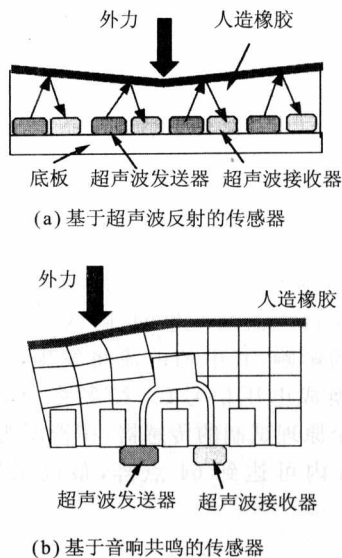


图 1.57 超声波分布式触觉传感器

极上涂抹了感压导电性油墨,因此可以用与感压导电橡胶相同的方法检测随压力变化的电阻改变情况。目前,已经制作了多种形状或图案的传感器薄膜,连同监视器组成显示压力分布的传感器系统一起在市场上出售。图 1.58(b)所示为测量人类手部抓持的情形^[72]。

4. 三维触觉传感器

触觉传感器表面不但受到垂直方向的作用力,而且可能受到任意方向的力,人们正在探讨能测量作用在传感器表面的三个分力的传感器^[73]。如果作用在圆环上的力是 F_x 、 F_y 、 F_z 三个分力,就会产生如图 1.59 所示的应力分布。如果在环的适当位置上贴上应变片,将应变片接入惠斯通电桥,就可以分别测出 F_x 、 F_y 、 F_z 三个分力。如果借助于半导体工艺在图 1.60 环形单晶硅表面制成应变片和引出信号的模拟开关,它们被氧化铝陶瓷基底支撑,就形成了一个 3mm×3mm 的多面体传感器单元。图 1.61 是它的结构图,把传感器单元制作在内置有放大器、多路开关等电路的基底上,就可以测量作用在传感器表面上各处的三个方向的分力。这种分布式三维触觉传感器正在开发之中。

取材自感压导电橡胶、光传感器、压电薄膜的传感器也已经三维化了。图 1.62(a)给出基于上述光反射型的触觉图像传感器原理

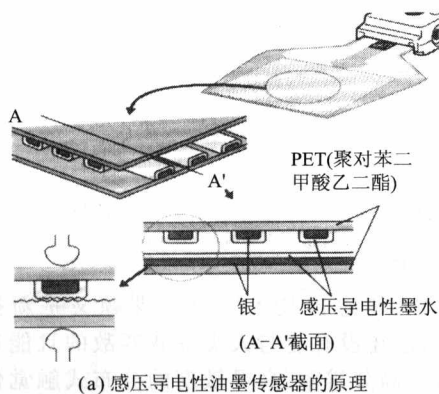


图 1.58 采用导电油墨的分布式传感器(Nitta(株))

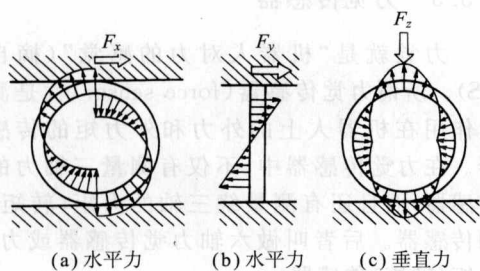


图 1.59 圆环的应力分布

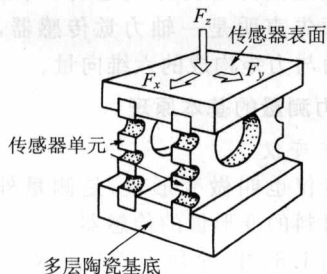


图 1.60 传感器单元的结构

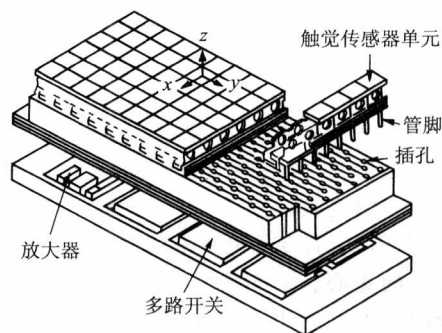
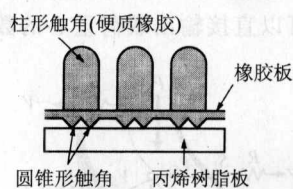
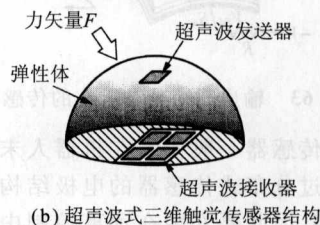


图 1.61 三维触觉传感器系统

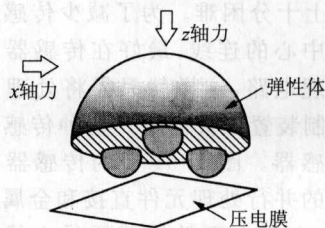
的光学三维触觉传感器的结构。如果硬质橡胶材料的柱形触角受到各方向力的作用，与丙烯酸树脂板接触的4个圆锥凸起的接触状态在水平力(剪切力)作用下发生变化，光传感器取出相应的变化后，将力沿各个方向进行分解^[74]。图1.62(b)的传感器采用4个超声波接收器，从位于弹性圆顶上的超声波发生器接收信号，检测力矢量^[75]。图1.62(c)是采用压电膜检测压力的传感器结构。



(a) 光学式三维触觉传感器结构



(b) 超声波式三维触觉传感器结构



(c) 压电膜式三维触觉传感器结构

图 1.62 三维触觉传感器原理

5. 带处理电路的传感器

分布式传感器能直接测出力和位移的分

布情况。利用这些信息对机器人进行控制时,必须对大量的输出信号加以处理。一般来说,这些信息处理工作大都是由微型计算机等通用计算机来完成的。若改用专用集成电路提取信号,将意味着计算机软件的负担会得到大幅度减轻。

有一种带有专用电路的传感器,可测出分布载荷的重心。如图 1.63 所示,在感压导电橡胶的上下层的边缘(黑色部分)装上金属电极,分别用 S_1 、 S_3 (上层)和 S_2 、 S_4 (下层)表示。设电压 V 和 $-V$ 分别经电阻 R 加到 S_1 、 S_3 及 S_2 、 S_4 电极上时,各个电极的电位分别为 V_{S1} 、 V_{S2} 、 V_{S3} 、 V_{S4} , 电流密度的重心 I_x 、 I_y 可由下式计算(详细推导过程请参阅第 4 篇 3.4 节):

$$I_x = \frac{k(V_{S1} - V_{S3})}{(2V + V_{S2} - V_{S4})}$$

$$I_y = \frac{k(V_{S2} - V_{S4})}{(2V + V_{S2} - V_{S4})}$$

可见,电流密度大致和加到传感器上载荷分布的重心相对应。将图 1.63 中的传感器接上一个能按上式进行运算的电子电路,传感器就可以直接输出载荷重心的数据。

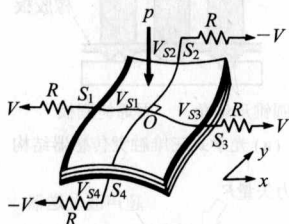


图 1.63 输出载荷分布重心的传感器

触觉传感器一般安装在机器人末端执行器上。不过分布式传感器的电极结构相当复杂,导线多,因此要安装在远离控制中心的末端执行器上十分困难。为了减少传感器到机器人控制中心的连线,最好在传感器内部带有信号处理电路,这样就只需将处理过的信息送到控制装置中去即可。这种传感器被称为智能传感器。图 1.64 中的传感器将硅基底上排列的并行处理元件直接和金属电极连接,然后在电极上面粘接感压导电橡胶。通过电极将橡胶电阻的变化读入处理器内部做信号处理。处理器可并行完成二维卷积积分、阈值处理、加减乘除等运算。

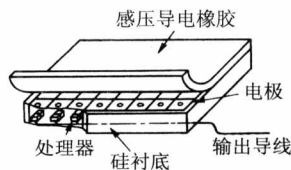


图 1.64 内置处理器的分布式传感器

6. 结 语

触觉传感器技术既是老课题又是新挑战。目前还没有能与人类皮肤匹敌的且能达到灵活、高分辨率、高灵敏度的分布式触觉传感器。当前对触觉的研究主要集中在两个方向上:一是如何基于三维信息提取剪切和滑动信息以提高抓持控制的性能;另一是如何改进柔软性和敏感度,满足与活体或易损坏物体直接接触的操作要求。

无论如何,与视觉处理相比,触觉相对简单,甚至还可以利用视觉信息处理的原理,因此传感器材料的开发成为这一领域中的重点。半导体微加工技术的进步,使感知系统与处理系统高度集成,以及开发高级触觉系统成为可能。

今后,为了扩大机器人的应用领域,分布式触觉将一定是不可或缺的。

谷江和雄 增田良介

1.3.3 力觉传感器

力觉就是“机器人对力的感觉”(摘自 JIS)。所谓力觉传感器(force sensor)就是测量作用在机器人上的外力和外力矩的传感器。在力觉传感器中,不仅有测量三轴力的传感器,而且还有测量绕三轴的力矩(转矩)的传感器。后者叫做六轴力觉传感器或力-力矩(转矩)传感器。

在机器人工程领域,说到“力”这个名词,狭义地就是指力与力矩的总称。在这里,只要没有预先声明是一轴力觉传感器,那么力都是指力与力矩构成的六维向量。

1. 力测量的基本原理

1) 应变仪

应变仪也叫做变形仪,是测量外力作用下变形材料的变形量的传感器。

在图 1.65 中,金属体的电阻 $R(\Omega)$ 与其长

度 $L(\text{m})$ 成正比, 与其截面面积 $S(\text{m}^2)$ 成反比。因此, 若取金属体的电阻率为 $\rho(\Omega \cdot \text{m})$, 则有

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

当该金属体受到沿长度方向的张力, 伸长 ΔL 时, 它的应变是 $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$, 这时直径 d 缩小 Δd , 截面面积缩小 ΔS 。于是, 长度方向的应变与直径方向的应变之比为

$$\frac{\Delta L/L}{\Delta d/d}$$

这个比叫做泊松比。根据以上分析就可以求出应变引起的电阻变化, 近似为

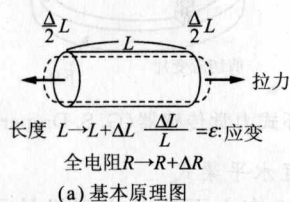
$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon$$

式中, k 是取决于金属的材料、形状、泊松比的常数, 也叫做应变片的灵敏度。

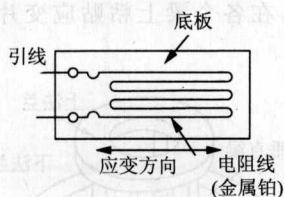
如图 1.65(b) 所示, 应变片是一种固定在底板上的细电阻丝, 根据所用材料的不同, 它可以分为以下几种:

- ① 电阻丝应变仪(采用电阻细线)。
- ② 铂应变仪(采用金属铂)。
- ③ 半导体应变仪(采用压电半导体)。

应变仪片能测量一个方向的应变, 不过也可以做成多种模式来测量二轴或三轴方向的应变。



(a) 基本原理图



(b) 应变片的构造

图 1.65 应变仪

应变片的电阻变化可以根据如图 1.66(a) 所示的桥式电路从电压的变化中测量出来。

$$E_o = \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R + \Delta R} \right) E_i \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E_i$$

给图 1.66(b) 中悬臂梁的上下两个表面贴上应变片, 在力 F 的作用下, R_1 受到拉伸力。 R_2 受到压缩力。如果按图 1.66(c) 所示组成电桥的两条边, 这样不但灵敏度高达 2 倍, 同时还消除了梁的横向拉力及温度膨胀的影响。这就是所谓的二应变片法, 至于在电桥的四边粘贴应变片的方法叫做四应变片法(图 1.66(d))。

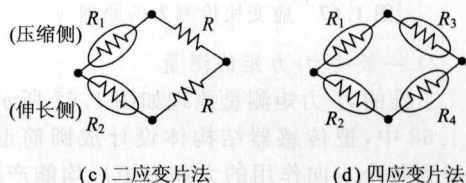
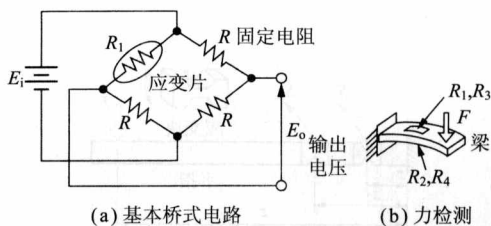


图 1.66 利用应变片测量力

2) 测力传感器

测力传感器属于一种精密负荷变换器, 是测量压缩或拉伸的最基本的检测器。其测量原理是在施加外力后出现应变的承载体(一般为圆柱或方形)上粘贴应变片, 由应变求出作用力的大小。

3) 半导体压力传感器

半导体压力传感器就是将半导体硅片的厚度蚀刻, 使其变薄, 加工成易变形的隔膜, 再在其上制作半导体应变片, 使其达到能检测压力的目的。这个压力传感器除了测量气体和液体压力之外, 还可以用于分布型触觉传感器或微小力觉的检测。

2. 力-力矩测量原理

1) 应变块方式

就以图 1.67 所示的 H 形应变块为例, 说明一轴力的测量方法。首先我们来考察根部带有两个彼此连接的应变块(检测部分)的梁。若在梁根部相距 z 的点处施加力 F , 应变块就受到力矩的作用, 应变片产生输出的 S_1 与 S_2 为

$$S_1 = k(z - z_1) \cdot F$$

$$S_2 = k(z - z_2) \cdot F$$

根据这两个式子, 可以求出 F , 即

$$F = \frac{1}{k} \frac{S_1 - S_2}{z_2 - z_1}$$

式中, $z_2 - z_1$ 为两个应变块之间的距离(已知); k 为常数, 在给定位置施加给定大小的力, 由传感器的输出就可以确定该常数的具体值。同时, 施加力 F 的位置也可以由下式求出:

$$z = \frac{S_1 z_2 - S_2 z_1}{S_1 - S_2}$$

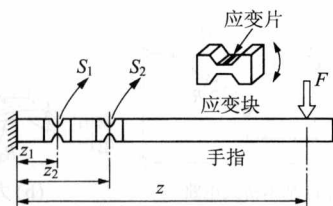


图 1.67 应变块检测力的原理

2) 一般的力-力矩的测量

三维的力-力矩测量原理如图 1.68 所示。图 1.68 中, 把传感器结构体设计成圆筒形, 它受到各个方向作用的力和力矩后均能产生应变。检测粘贴在相应部分的应变片的应变, 便可以计算出力和力矩。

如图 1.68 所示建立坐标系, 假设各个方向的力为 F_x 、 F_y 、 F_z , 围绕各个轴的力矩为 M_x 、 M_y 、 M_z , 所受总的力矢量为 \mathbf{F} , 应变片粘贴在由传感器结构体发生特定应变的 6 个部位, 应变片的输出 S_1, S_2, \dots, S_6 分别与各个部分的应变成比例。于是, 传感器的输出矢量 \mathbf{S} 可以通过下式求出:

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}\mathbf{F}$$

其中,

$$\mathbf{S} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4 \ S_5 \ S_6]^T$$

$$\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$$

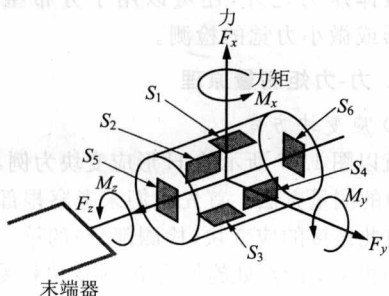


图 1.68 力检测的基本原理

6×6 矩阵 \mathbf{C} 叫做力-应变转换矩阵, 由传感器的结构确定。该矩阵的各个元素可以根

据在各个方向上单独作用力和力矩时, 通过传感器的输出来标定。要从传感器输出中提取各个方向上的力和力矩, 要求出 \mathbf{C} 的逆矩阵, 即传感器矩阵 \mathbf{C}^{-1} , 即

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{S}$$

3. 力觉传感器的结构

力觉传感器是从应变来测量力和力矩的, 所以如何设计和制作应变部分的形状, 恰如其分地反映力和力矩的真实情况至关重要, 应该注意以下几点^[84]:

- ① 无产生摩擦的滑动部分, 无迟滞现象。
- ② 变形应力不超出材料的弹性范围。
- ③ 获得六个彼此独立的地点应变信息。
- ④ 各个轴之间干涉小。

下面, 介绍几个典型的力觉传感器的基本结构。

1) 环式

图 1.69 中在两个环之间设计了三根支柱, 在环的外侧粘贴测量剪切变形的应变片, 内侧粘贴测量拉伸-压缩变形的应变片^[85]。

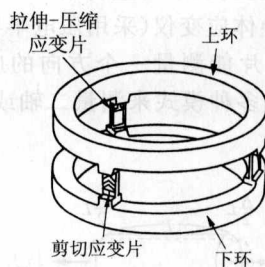


图 1.69 环式力觉传感器(G. S. Draper 研究所)

2) 垂直水平梁式

图 1.70 在上下法兰之间设计了垂直梁和水平梁, 在各个梁上粘贴应变片构成力觉传感器^[86]。

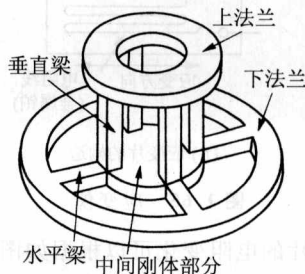


图 1.70 垂直水平梁式力觉传感器
(Dr. R. Seiner 公司)

3) 圆筒式

把圆筒的纵向梁和横向梁组合起来构成对于特定的轴具有高灵敏度的力觉传感器,如图 1.71 所示。在这种结构设计中,横向梁和纵向梁分别仅仅沿单方向发生变形,然后再通过应变片检测它们^[87]。

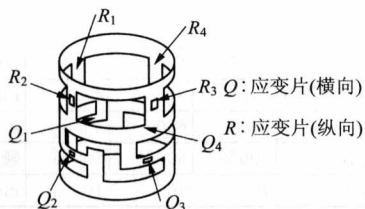


图 1.71 圆筒式(Stanford Research Institute)

4) 四根梁式

这个形式的力觉传感器基于 V. Scheinman 提出的结构,即图 1.72 所示的从中心轴沿 4 个方向伸出四根梁,在各根梁的所有侧面粘贴应变片的传感器^[88]。图 1.72 定义了 xyz 轴的方向,并用下角标 S_{xy} 、 S_{xy} 、 S_{xz} 、 S_{yz} 表示检测方向和传感器所在的轴,设正方向用 1 表示,负方向用 2 表示。如果再在各个梁的背面也粘贴应变片,就能构成电桥,让沿坐标轴正方向施加的力得到正信号输出。如果把梁的结构简化为一个简单的力学模型,力和力矩可以按照下式求出,式中, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 均是常数,而干涉项取作零。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_2 & k_2 & k_2 & k_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_3 & k_3 & 0 & 0 \\ -k_4 & k_4 & -k_4 & k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{xy1} \\ S_{xy2} \\ S_{xz1} \\ S_{xz2} \\ S_{yz1} \\ S_{yz2} \\ S_{xy1} \\ S_{xy2} \end{bmatrix}$$

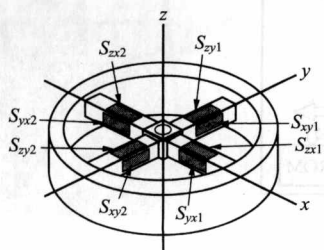
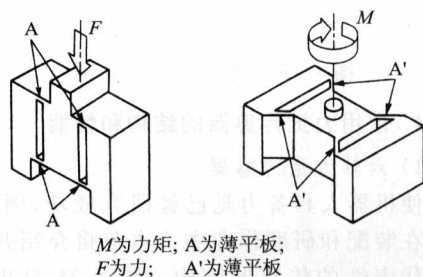


图 1.72 四根梁式力觉传感器

如果这个力和力矩传感器安装在手腕部分,只要将其转换到末端执行器坐标系中,就可以求出作业端的力和力矩。

5) 平行平板式

如图 1.73 所示,把三组对单方向力作用敏感的平行平板式结构和对单轴力矩作用敏感的辐射平板结构串联组合起来就构成了六轴力觉传感器^[89]。



(a) 平行平板结构

(b) 辐射平板结构

图 1.73 平行平板式和辐射平板式

6) 应变块组合式

在三维空间内把前面介绍的六个应变块组合起来,就可以组成一个六轴力觉传感器。图 1.74 所示是其连接图^[90]。

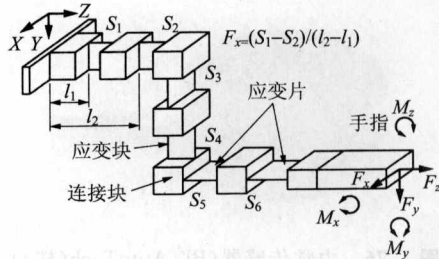


图 1.74 应变块组合式

7) 光学式

图 1.75 给出光学式力觉传感器的基本组成。发光元件和光接收元件彼此相对安装,于是测量它们之间相对位移引起的光接收信号的变化,即可推算出外力。图 1.75 给出了一个具体的设计方案,接收元件采用分割型光传感器,把它划分成四个光接收面,这样在测量两个方向的相对位移时,还可以补偿温度变化和灵敏度变化的影响。把三个这样的光学传感器单元组合起来而构成的光学式六轴传感器已经被研发出来^[91]。光学式力觉传感器的特点是弹性体的结构比较简单,

柔软性即刚性可设定等,这些特点是应变片式传感器所不具备的。

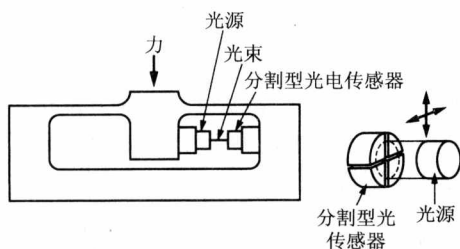


图 1.75 光学式(东工大)

4. 常用力觉传感器的结构和性能

1) 六轴力觉传感器

使机器人具备力觉已经研究成功,例如,已用在装配和研磨作业中。本节将介绍几个具有代表性的传感器结构。图 1.76 是市场上出售的四根梁式力觉传感器的外形,表 1.4 给出了其性能指标。

该力觉传感器的控制器由图 1.77 所示的结构组成。即各个部分的应变信号被放大后送入控制器,经 A/D 转换,再根据传感器的常数矩阵计算力和力矩,最后经并行或串行信号的形式输出给计算机。

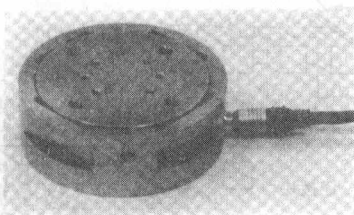


图 1.76 力觉传感器(BL AutoTech(株))

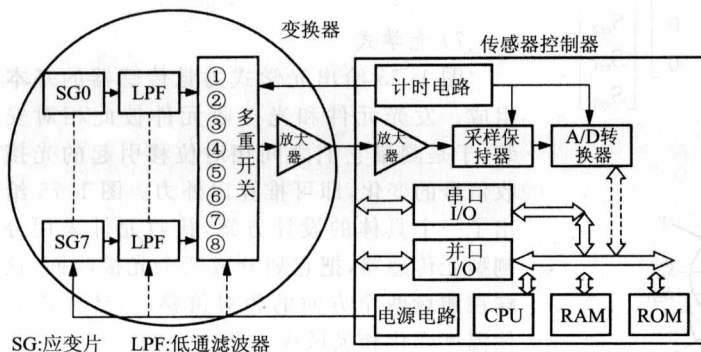


图 1.77 传感器控制器的组成^[92]

表 1.4 六轴力觉传感器的性能指标举例

性能	模型 A	模型 B	模型 C	单位
额定载荷(力)	5	30	160	kgf
(转矩)	50	300	2400	kgf · cm
精度	1.0%	1.0%	1.0%	额定
分辨率(F_x, F_y)	5	25	125	gf
(F_z)	15	75	375	gf
(T_x, T_y, T_z)	30	150	1200	gf · cm
尺寸(直径)	78.7 ϕ	78.7 ϕ	150 ϕ	mm
(厚度)	27.7	30.6	47.2	mm
质量	260	680	4550	g
许用过载	500%	500%	500%	额定
通信速度	10	10	10	ms

2) 超小型手指力觉传感器

检测指尖的超小型力觉传感器也已经实用化。该传感器的质量为 70g、直径为 18mm、分辨率为 0.8gf、额定力输出为 1.2kg、力矩分辨率为 0.5gf · cm、额定力矩为 1.0kgf · cm^[92]。图 1.78 是超小型力觉传感器的使用现场情况。

5. 与力觉传感器相关的课题

1) 精度与分辨率

在机器人的力控制中,与力的绝对精度相比,分辨率更重要一些。用于测量的精密测力传感器已经实现了 0.01% 的精度,不过多轴力觉传感器仅限于 0.1% 数量级。如果分辨率达到 1/1000 以上就可以用来实现微小的力控制。

2) 校正方法

为了进行高精度校正,需要研究能够正确地向任意两个以上的轴施加作用力的机构。此外,误差分析法和高精度法正在研究之中。

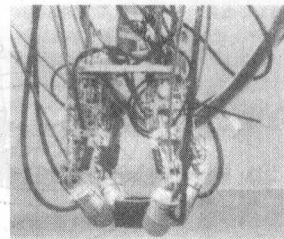


图 1.78 带手指力觉的4根手指(产总研)

3) 应用技术

将力传感器实际安装在机器人上使用,从安全和保护装置本身的角度出发,必须避免发生碰撞。进一步说,即使传感器带有保护机构发生碰撞时也存在损坏的可能性。

4) 力控制应用

机器人越来越被广泛地应用于与人类协调作业或灵巧操作等任务。此时,混合控制、阻抗控制、双向控制等力控制方法不可缺少。用户期望着获取力信息的机器人控制器能系列化和实用化。

5) 新型力觉

力觉是已经达到实用化水平的为数不多的机器人传感器之一,如果要求更高一些,那么新型力觉传感器还应该具有:①柔软力觉传感器,以便其与人类共处;②满足动力学高速控制(小于1ms);③超小型力觉传感器,以便应用于微型机械手等。

增田良介

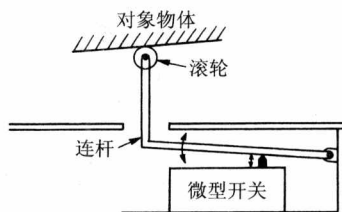
1.3.4 接近觉传感器

接近觉传感器是一种能在近距离范围内获取执行器和对象物体之间空间相对关系信息的传感器^[93]。它的用途是为了确保安全,防止接近或碰撞,确认物体的存在或通过,测量物体的位置和姿态,检测物体的形状,进而用于作业规划和动作规划的生成、修正、躲避障碍物、避免碰撞等。通常,接近觉传感器安装的空间比较狭窄、有限,因此要求其体积小、质量轻、结构简单以及稳定和坚固。在设计和制造时,必须在充分理解检测基本原理的基础上,充分考虑周围环境条件及空间限制,选择适合目标的检测方法,以满足要求的性能。

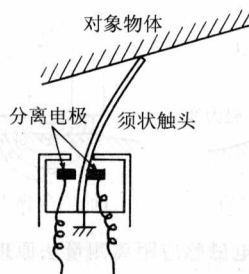
1. 接触式传感器

接触式传感器用于定位或触觉,是检测物体是否存在的最可靠的一种方法。接触式传感器的输出信号有多种形式,如接触或不接触状态对应于开关的通断、对象物体与触点间有无电流产生、梁的弹性变形产生的应变片电阻的变化等。探针法利用探针与对象物体表面的接触作用甚至能检测出纳米数量级晶粒的高低不平度。但是,接触式传感器的使用范围会受到一定限制。例如,在分离状态下是无法实现检测的。另外,它有时会成为运动的障

碍,甚至损坏物体表面。图1.79示出了接触式接近觉传感器的具体结构。



(a) 微型开关和连杆机构组成的接近觉传感器

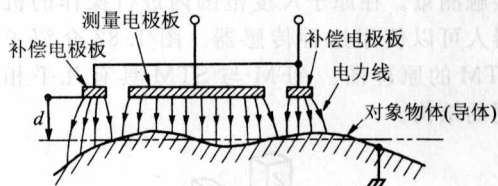


(b) 须状接触式接近觉传感器

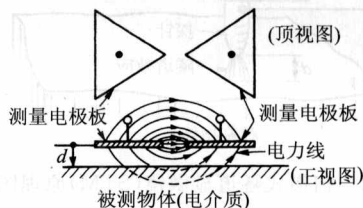
图 1.79 接触式接近觉传感器结构

2. 电容式传感器

电容式接近觉传感器的原理是电容量与电极面积、电介质的介电系数成正比,与电极之间的距离成反比^[94]。如果固定相对电极的面积和介电系数都一定,则根据电容的变化就可以检测出电极和导体对象物体之间的距离。图1.80是电容式传感器的原理图。



(a) 检测对象为导体



(b) 检测对象为电介质

图 1.80 电容式距离测量法的原理

3. 电磁传感器

如果钢铁等强磁性对象物体和气隙组成了磁路的一部分,那么用霍尔元件等器件测量磁场强度,或者测量由磁阻变化引起的线圈感抗的变化,就可以测量对象物体与磁路元件之间的距离。如果被测对象属于非磁性导电物体,那么在交变电磁场的作用下将会产生涡流,引起励磁线圈输入电流的变化,这同样可以测量距离(图 1.81)。

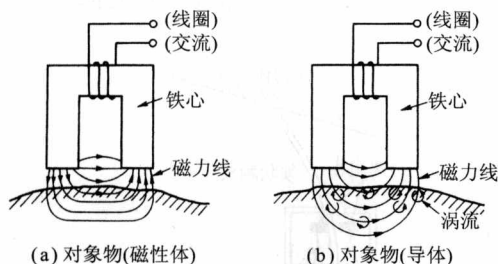


图 1.81 电磁感应距离测量法原理图

4. STM, AFM

当前端尖锐的探针和试料表面接近到彼此的电子云互相重合的程度时,二者之间就会发生所谓的隧道电流。利用这个原理观察试料表面状态的设备被称为扫描式隧道显微镜 (STM: Scanning Tunneling Microscope)^[95]。利用探针和试料之间产生的引力或斥力观察试料表面的原理制成的设备称作原子力显微镜 (AFM: Atomic Force Microscope)。它可对表面状态进行原子量级的非接触测量。在原子尺度范围内进行操作的机器人可以使用这种传感器。图 1.82 介绍了 STM 的原理图。AFM 与 STM 具有几乎相同的结构。

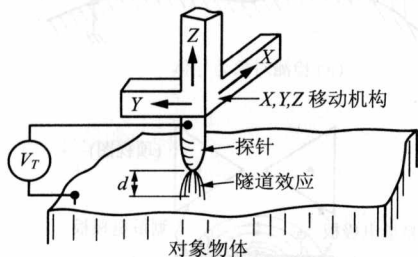


图 1.82 扫描式隧道显微镜 (STM) 原理图

5. 流体传感器

流体传感器的原理是将气体或液体喷向物体表面,通过测量压力、流量的变化来判定

有无物体存在,或者用以测量物体的距离。流体传感器不受磁场、电场、光线等噪声的干扰,对环境的适应性强,可用于冲压工序、焊接和切割焊枪的控制、零件组装工序、搬运工序、零件的计数和确认等应用场合。图 1.83 是气流传感器的结构原理图。

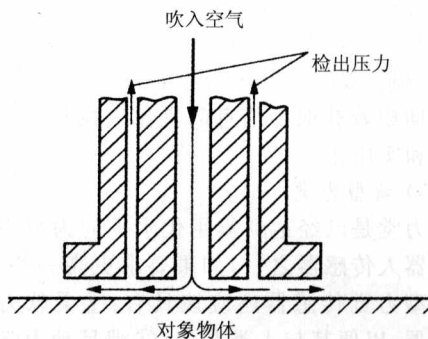


图 1.83 气流传感器的结构原理图

6. 超声波传感器

超声波传感器发射超声波脉冲信号,测量回波的返回时间便可得知到达物体表面的距离^[97]。这种方法特别适用于不允许使用光学方法的混浊液体等环境场合。如果安装多个接收器,根据相位差还可以得到物体表面的倾斜状态信息^[97]。但是,超声波在空气中衰减得很快(在 1MHz 的条件下为 12dB/cm),因此其频率无法太高,通常使用 20kHz 以下的频率,所以要提高分辨率比较困难。图 1.84 是超声波测距传感器的原理图。

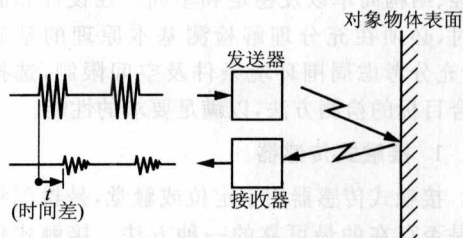


图 1.84 超声波测距传感器的原理图

7. 光学测距法

光学测距法适合对远处物体的非接触测量,因此这种方法很早以前就被广泛应用。测量距离可以利用光的直线传播性、聚束性、波动性、光速等各种性质^[98]。其大致可以分为被动法(利用自然光)和主动法(利用强光源照射)。图 1.85 所示的三角测量原理是最

基本、最重要的原理,大多数光学测距法都多多少少与这个原理相关。近年来,超小型摄像装置问世,同时信息处理器的体积也越来越小,性能越来越高,所以开始适合接近传感器的应用,详细内容见本手册第4篇(智能技术篇中1.“视觉信息识别”)。

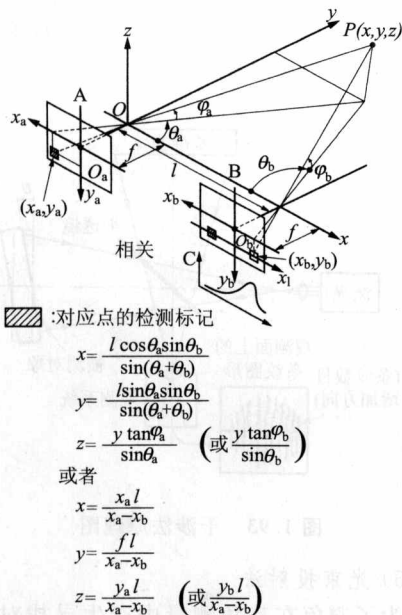


图 1.85 三角测量法的原理

1) 利用物镜的成像条件

在利用物镜成像条件的测量距离方法中,如何判断成像的最佳状态(即聚焦与否)是主要的研究课题之一(图 1.86)。一般的做法是把焦点调整到观测面上成像明暗反差最大的位置上,自动聚焦照相机就是采用这种聚集方法。在主动法中有像散法(图 1.87)、刀刃法(图 1.88)、临界角法(图 1.89)等。目前也在研发各种新的方法,例如,实现录像机磁头焦点偏移的检测和跟踪^[99],以及用于表面粗糙度测量的光探针等^[93]。

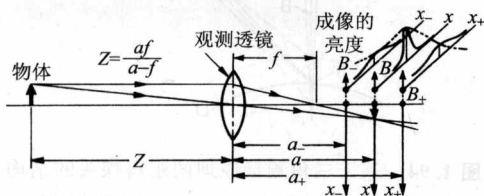


图 1.86 透镜成像条件和距离测量原理图

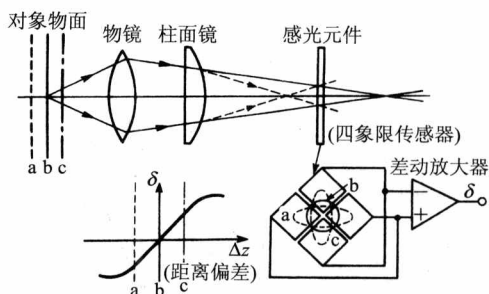


图 1.87 像散法距离测量原理图

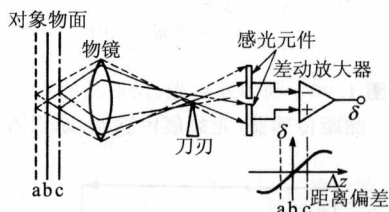


图 1.88 刀刃法原理图

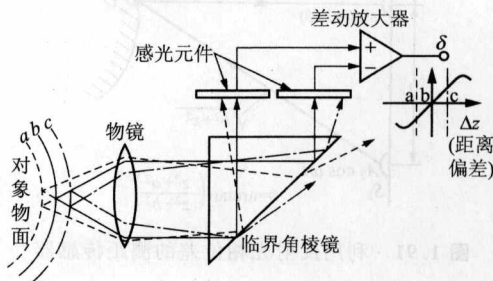


图 1.89 临界角法的原理图

2) 利用反射光强度

观测表面成像的亮度取决于被测物体表面的反光特性、位置(距离)和取向、照明光源的位置、方向、性质、观测系统的位置和姿态等因素。例如,借助于点光源照射,就可以根据物体表面的照度和距离平方成反比的原理测量距离。再如发射红外光线,通过有无反射光^[100,101]或强弱,检测物体是否处于指定的位置上的距离传感器已经广泛地得到应用^[102]。又如用光纤投射光线,从另一束光纤检测光线,根据反射光量的变化测量距离的传感器适合在狭窄空间内应用(图 1.90)。图 1.91 是另一种测距传感器的设计方案,它将几种照明光加以调制,利用相位差来测量距离,其优点是减轻了对被测物体表面状态的影响^[103]。

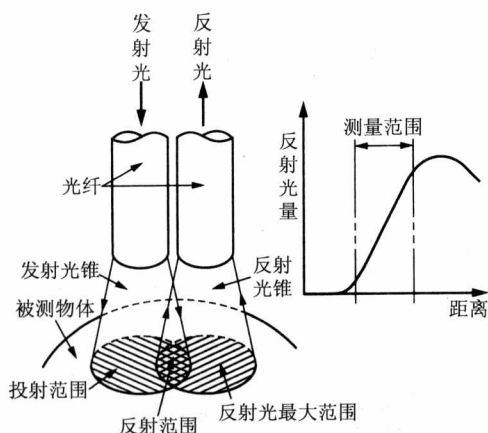


图 1.90 利用发射光、反射光的光纤测距传感器(光裂痕传感器)原理图

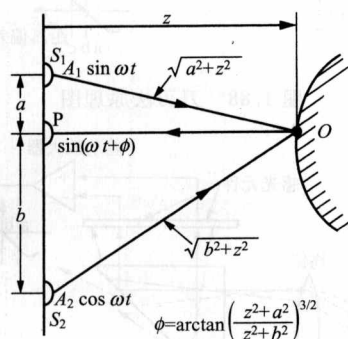


图 1.91 利用反射光相位差的测距传感器

3) 利用光速

发射光在被测物体表面被反射,根据返回的时间,可以求出光传播的距离,这就是所谓的激光雷达法,或者是图 1.92 中的飞行时间法(time of flight)^[104]的测量原理。通常的做法是把发射光进行振幅调制,然后检测反射光的相位差来求算距离。不过,利用光速测量的原理做成的接近觉传感器也有一定的缺点,因为距离太近时分辨率比较低,而且装置的体积也过大。

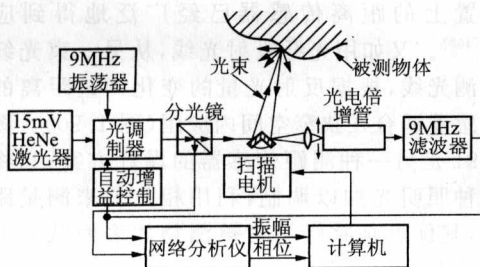


图 1.92 飞行时间法原理图

4) 利用光的波动性

光是高度稳定的振动波,以光波长为基准测量距离,可以得到稳定和高精度的结果。激光测长仪以光的波长为标度,它针对光路差产生的干涉条纹的变化进行计数,实现距离测量,已经成为当今精密机械中不可或缺的定位装置^[98](图 1.93)。不过激光测量的精度受到环境因素及测试条件的制约,因此一定要建立一个减震环境。

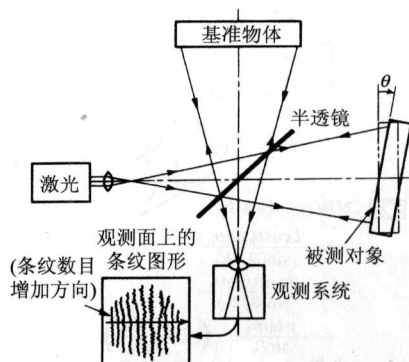


图 1.93 干涉法原理图

5) 光束投射法

为了避免在三角测量中产生寻找对应点的困难,可以改成光束照射物体表面形成光斑,根据光斑在观测面上的位置和三角测量原理,依次求出光斑的三维位置^[105](图 1.94)。通常使用摄像管、固态成像元件、半导体位置检测元件(PSD)等检测光斑的位置。距离测量精度在很大程度上取决于斑点位置的检测精度。有人曾尝试用万花筒光学系统扩大检测的范围^[106],以及将一维像位置检测元件和柱面镜进行组合来提高精度^[107]。图 1.95 是一

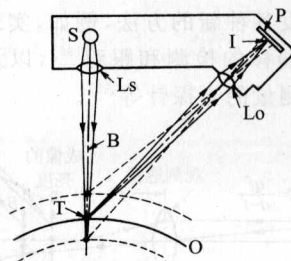


图 1.94 基于三角测量原理的距离探头的结构
S 为光源(LED、激光二极管);Ls 为光速照射透镜;
B 为光束;O 为被检测对象;T 为光斑;I 为光斑像;
P 为像位置检测元件;Lo 为观测透镜

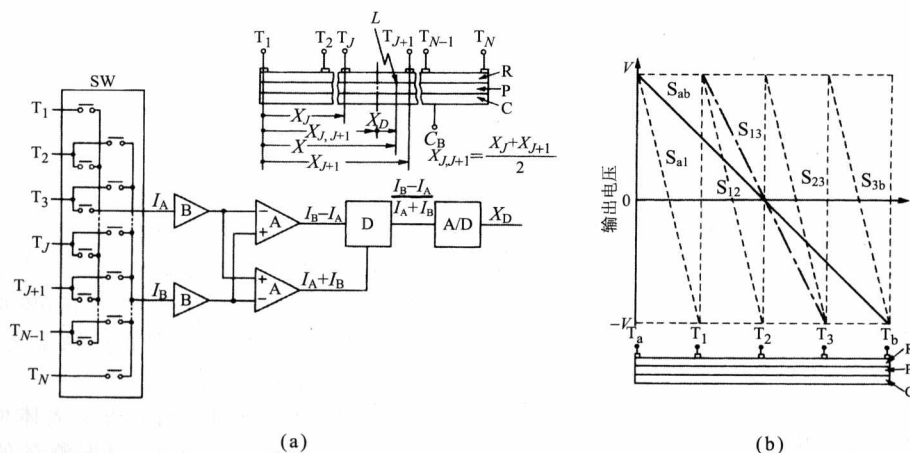


图 1.95 R-HPSD 原理图

R 为电阻层; P 为光电层; C 为衬底; $T_1, \dots, T_J, \dots, T_N$ 为输出电极; SW 为输出端转换开关; I_A, I_B 为输出电流; X_J 为第 J 个输出端的位置; X_D 选择区内的检测位置; S_{jk} ($j, k=a, 1, 2, 3, b$); 选择第 j 个和第 k 个输出电极时的输出特性

个混合型 PSD(R-HPSD) 设计方案^[106], 它能大大提高斑点成像位置的相对分辨率, 既不降低检测速度, 又能收到显著改进测量精度的效果。在图 1.96 中介绍了一种发射带状光的光切断法^[108], 同样是基于三角测量原理。这种方法可以十分稳定地测得沿亮线的三维信息, 在工业中已经得到广泛的应用^[109]。

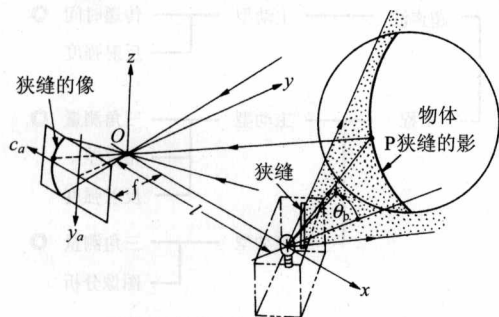


图 1.96 光切断法原理图

6) 格子投影法

向物体表面投射直线格子, 摄制所生成的变形格子的图像, 将变形格子的图像与直线格子的进行重叠, 产生莫尔条纹等高线图形, 再进行莫尔条纹表面形态测量。上述方法都归结为判断对应或凹凸的问题。具体的做法如图 1.97 所示, 把格雷码等符号化的编码格子按时间序列向物体进行投影, 被测量像素在投影面上的对应位置以编码形式被检

测出来, 就能得到距离图像^[110]。现在带液晶光阀的生成符号化格子的电子元件^[110]已经被开发出来。利用这种元件, 可以得到高速、稳定、小型的距离测量系统。

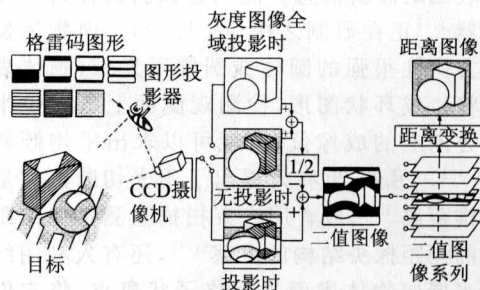


图 1.97 编码格子投影法原理图

7) 三角测量法距离传感器的小型化

三角测量法的基准线长度对确保距离的测量精度起到了重要的作用, 它也是传感器小型化的障碍之一。为了降低对基准线的要求, 有人提出如图 1.98 所示的理研式小型光学测距法(RORS)^[111]。其原理和结构比较简单, 适合小型化, 可望制成光探针或装在机器人手指上的小型接近觉传感器。目前, 三维形状测试仪仍然以接触式探针为主流^[112], 光学非接触式测量方法仍然处于试验阶段^[113], RORS 小型光探针的发展有助于改变这样的状况。

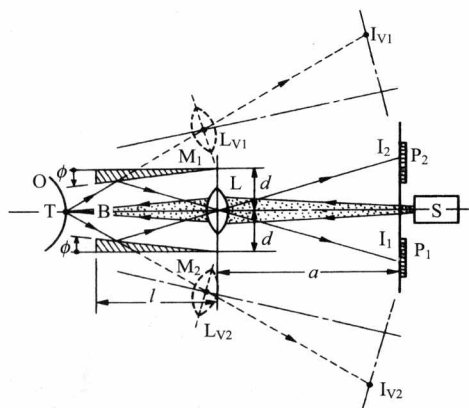


图 1.98 RORS 的原理图

M_1, M_2 为镜; L 为观测透镜; P_1, P_2 为像位置检测传感器; S 为光源; B 为光束; O 为物体; T 为目标点; L_{v1}, L_{v2} 为虚拟透镜; I_1, I_2 目标点的像; I_{v1}, I_{v2} 为目标的虚拟像

$$z = \frac{2ad\cos^2\phi + r_{m1}d\sin 2\phi}{r_m\cos 2\phi - a\sin 2\phi}$$

8) 倾斜信息的获取

如果用三维形状测试仪探头或仿形控制传感器测量物体边缘或孔的位置,那么它不但要测量点的距离,而且希望能同时获取对象表面的倾斜信息。能测量倾斜的接近觉传感器^[114]正在研制之中(图 1.99)。向物体发射方向性很强的圆柱或圆锥形光带,物体表面将生成环状图形,检测观测面上各方位半径方向上的成像位置,就可以求出平均倾斜角^[115]。另外,也有人提出了用光切断法测量一维距离^[116],或者用光束扫描法测量二维距离的测距探头结构的方案^[116],还有人利用纤维光栅向物体表面投射格子状斑点,将它们输入固态摄像机测量与对象物体的距离和表

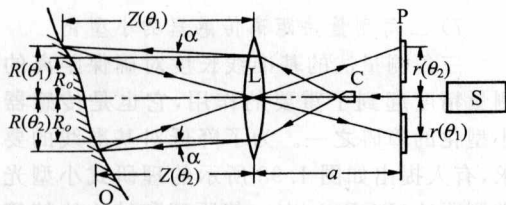


图 1.99 根据环状投影测量表面倾斜的方法

S 为激光; C 为锥面透镜; L 为观测透镜; P 为观测面; O 为物体

$$\begin{aligned} Z(\theta) &= \frac{aR_0}{r(\theta) - a \tan \alpha}, R(\theta) = \frac{R_0 r(\theta)}{r(\theta) - a \tan \alpha} \\ g(\theta) &= \frac{z(\theta) - z(\theta - \pi)}{R(\theta) + R(\theta - \pi)} \\ &= \frac{aR_0(r(\theta) - r(\theta - \pi))}{2r(\theta)r(\theta - \pi) - ar(\theta) + r(\theta - \pi)\tan \alpha} \end{aligned}$$

面倾斜度,做成形状测量传感器^[117]。

出泽正德

1.3.5 距离传感器

要想使机器人能很好地适应环境进行工作,传感器是不可缺少的。目前已经有不少提取外部信息的传感器了,其中测量到目标物体距离的距离传感器对机器人避障运动和绘制环境地图非常有用。测量到对象物体距离的传感器也有接触型和非接触型之分,本节将讨论非接触型距离传感器。

非接触测定空间距离的方法大体可以按图 1.100 进行分类。首先,根据测量的介质可以分为超声波传感器和激光或红外线等光学距离传感器。根据测量方式可以分为主动型(向被测对象物体主动照射超声波或光线)和被动型(不向对象物体照射光线,仅依据发自对象物体的光线)。超声波传感器只有主动型,它的测量原理就是根据超声波从收发器到对象物体之间往复传递所花费的时间长短来计算距离。也有人尝试从超声波反射波的强度来推算距离的方法。



图 1.100 距离传感器的分类

光学距离传感器也有主动型和被动型的之分。主动型依据的测量原理有三类:基于三角测量原理的方法、调制光相位差的方法、基于反射光强度的方法。被动型依据的测量原理有两类:基于多个摄像机的立体视觉三角测量法、基于单个摄像机获得单张图像加以分析得到距离信息的方法。本节主要讨论图 1.100 中带◎标志的方法。

下面就超声波距离传感器和光学距离传感器的距离测定原理做一下说明。顺便介绍它们的优、缺点和近年来的研究动向。

1. 超声波传感器

1) 超声波的基本知识

超声波就是频率高达(约 20kHz 以上)人类的耳朵听不见的声波。一般地,波有纵波和横波两类,声波和超声波都属于纵波(靠介质的疏密变化来传递波),波在真空中无法传播。通常,在空气中传递的超声波频率采用 25~200kHz 的,在水中传递的超声波采用数百千赫[兹]到数兆赫[兹]的。

超声波的产生和检测借助于电-声变换器。敲击某一物体使其产生振动,振动的频率是一定的,由物体的形状、尺寸、质量等决定。这个频率叫做固有频率。但是如果给超声波变换器施加脉冲,从它发出的超声波的波形是以中心频率作为固有频率的脉冲(图 1.101)。



图 1.101 超声波脉冲波形

声波里带有多种频率不同的波,不过声音的传播速度,即音速与频率无关,仅取决于介质。例如,在 20℃ 的空气中声音的传播速度是 340m/s,20℃ 的水中是 1530m/s,固体铁中是 5180m/s。一般来说,介质越坚硬、密度越大,则音速越快。超声波的波长 λ 与超声波的频率 f 、音速 c 之间存在如下关系:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.18)$$

式中,音速 c 随介质数值的不同而不同,波长 λ 随频率 f 的增高而降低。因此,进行换算后得到空气中 40kHz 的超声波的波长是 8.6mm。超声波测量距离的精度在很大程度上取决于波长,如果测量精度的要求高,波长应该短,即需要采用频率较高的超声波。

超声波的性质使它具有回折、反射、衰减等现象。既然超声波是属于波的一种,它应该具有与一般波动现象同样的性质。在图 1.102 中,沿着壁面直线行进的超声波在壁消失的地方会沿着它的边缘产生绕射效应,即超声波从照射一侧看不见的部分折返回来。另外,它会在固有声阻抗的不同边界产生反射。声阻抗 Z 是材质的固有值,与材质的相

对密度 ρ 、音速 c 有以下关系:

$$Z = \rho c \quad (1.19)$$

如果材质之间的 Z 相差很大(例如,空气和墙壁),那么超声波在它们的边界处几乎完全被反射回来。随着超声波的传递,它的振幅将慢慢地衰减,这是由于声波的扩散效应和波能量被介质吸收的缘故。由于这个原因,超声波距离传感器的测量范围不可能很大,在空气中只能测量数米左右的距离。由于衰减程度随频率的增大而趋于严重,因此从这个角度看采用尽可能低的频率是恰当的。不过这与前述有关测量精度的结论正好存在矛盾,因此在实际应用的场合应该彼此协调,以取得满意的测量结果。

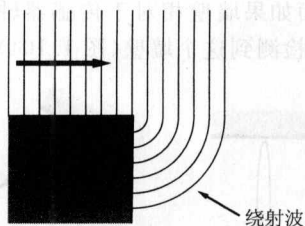


图 1.102 超声波的绕射效应

2) 超声波测距

超声波测量距离只有主动型方法,就是通过观测自身发射的超声波的回波。测量距离的原理通常都是所谓的脉冲回波方式。就是向对象物体发射超声波后,测量发射和返回的往复时间。如果取往复时间为 t ,音速为 c ,则到对象物体之间的距离 L 由下式确定:

$$L = \frac{ct}{2} \quad (1.20)$$

超声波测量距离的优点是电路及信号处理简单,测量精度较高,装置小且便宜,而且与光学方法相比它所受到的干扰小一些。超声波能在液体,特别是不透光的、混浊的水或其他液体中传播,所以可以将其应用在光学传感器无法胜任的场合,这就增加了它的重要性。在机器人领域,在大多数情况下它被选来进行环境识别。

至于它的缺点,由于超声波往复传送的时间相对较长,故与光学的方法相比,它花费的测量时间比较长。另外,单个超声波传感器只能得到一维距离信息,因此要想获取二维信息就需要增加传感器的数量^[118],或者改

成扫描形式(图 1.103)。

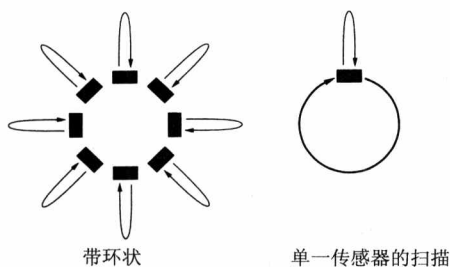


图 1.103 超声波传感器获取二维数据

假设整个圆周 360° 按每份 15° 分成 24 个方向顺序发送超声波, 测量 5m 的距离, 那么超声波发送时所花的时间仅为 0.7s。在通常的室内环境下, 几乎所有的墙壁都会反射超声波, 然而如果墙壁相对于传感器轴线倾斜, 它就无法检测到这个墙壁(图 1.104)。

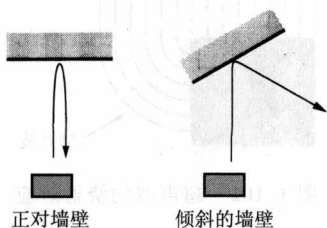


图 1.104 超声波传感器测量与墙壁的距离

原则上, 超声波只能测量出最近点的距离。但是如果要对接收的全部信号进行计算处理的场合则情况就不同了, 简单的硬件电路往往难以完成距离的测量。目前已有报道说有人正在研究超声波测量更远距离信息的可能性^[119]。另外, 有人在开展利用超声波回波的强度和持续的时间测量对象物体距离等环境信息的研究^[120]。

3) 超声波传感器测量方位

超声波的指向性比光线弱, 即使直线发射的超声波也不断地向远处扩散。因此, 纵然检测到某个物体的距离也无法严密地知道它的方向。一般来说, 数十赫兹左右的超声波在空气中传播时, 单个换能器输出的超声波指向角为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。

因此, 人们正在研究用多个接收器求墙面角度和曲率的方法^[121~123], 就是通过接收器各自获取的超声波往复传播时间差 Δt , 按照下式求出反射点的方位 θ 。式中, c 为音速, d 为接收器的间隔(图 1.105)。也有人提出把

超声波向全周方向同时发射, 测量全周数据的方法^[124]。

$$\sin \theta = \frac{c \Delta t}{d} \quad (1.21)$$

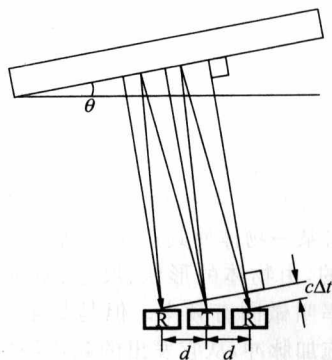


图 1.105 多个接收器的方位测量

4) 超声波传感器的干涉防止

显然, 在使用中同时输出的超声波相互之间存在着干扰。在多个超声波传感器发送声波的条件, 目前基本上还没有手段能够得知所接收的信号到底对应于哪个传感器发出的。因此, 为了防止超声波彼此之间的干涉, 有人提出控制发送时序, 使相互之间发送不重叠的方案。可是, 如果有多台机器人处于同一环境下, 问题就来了。为此, 又有人提出把发送的信号进行编码, 各自识别自己发出的超声波的方法^[125, 126]。

2. 光学距离传感器

与超声波相比, 光学方法测量距离的优点在于测量范围大, 光的直线性可以很精确地求出距离, 而且能在短时间内获得二维或三维大范围的距离信息。光学方法的缺点是摄像机和光源位置及姿态的标定相当麻烦, 测量范围受到摄像机视野的限制, 并且它无法用于不透光的环境。如前所述, 超声波传感器只有主动型, 但是光学传感器既有被动型也有主动型。

1) 被动型

被动型传感器有两种使用方法: 一种是用多个摄像机得到立体视觉; 另一种是用单个摄像机得到单张图像, 然后经过分析获取距离信息。立体视觉的方法是通过提取多个画面中对象的同一个地点的对应点, 再用三角测量方法计算对象的距离(图 1.106)。

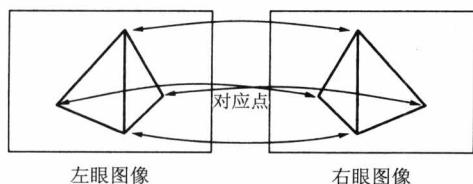


图 1.106 立体视觉方法

图 1.107 给出了三角测量的原理。图 1.107 中 L 是到对象物体的距离, d 是观测两点之间的距离, α, β 是从平行的两个摄像机的视线方向到对象物的方向之间的角度。距离 L 可由下式求出:

$$L = \frac{d}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (1.22)$$

只要摄像机能拍摄出环境的图像,那么这个方法就是有效的。不过,求出两台摄像机所拍摄的图像之间的对应点却是一个很大的难题^[127]。原则上,可以在两张图像中设置小窗口,寻找它们之间的相关值最高的部分,就可以求出对应点。不过这个方法要花费很多处理时间,由于硬件的进步,实时处理的时间已经逐渐接近实用了^[128,129]。利用三台以上的所谓冗余摄像机也可以进行距离处理^[127]。当然,一台摄像机自身移动,从多个视角获得图像的方法也是可行的,但是却随之衍生了精确求解移动前、后的视点之间位置关系的新问题。

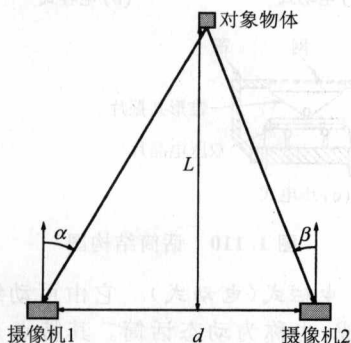


图 1.107 三角测量原理

其他还有一些方法。例如,借助于事先已有的知识对某台摄像机获取的图像进行分析,从而求出对象物体的位置和姿态^[127]。如果对象物体种类和大小已知,那么这种方法在工厂的零部件识别等方面是非常有效的。

2) 主动型

在主动型传感器的三角测量中,实际上

是把被动型立体视觉的两台摄像机中的一台变为模式光投影器,由另一台摄像机捕捉它所投影的模式图案。

至于投影的模式,有单点光、狭缝光、点阵光、二值模式、灰度模式、彩色模式等(图 1.108)。如单点光,为了得到全视野内的数据,需要进行二维扫描,通过扫描反复进行细密的采样后即可得到精密的数据。在照射狭缝光(激光)的场合,用摄像机获取投影到物体后光线模式畸变的情况^[130]。为了在一次测量中获得二维距离数据,应该用狭缝光沿着与狭缝垂直的方向进行一维扫描,就可以得到视野内的所有距离数据。如果投影二维光点阵列(点阵光),那么根本无需进行扫描,一次性即可测量视野内的全部空间^[131]。如果在空间中粗略地对单点光的间隔进行扫描,就可以实现高速测量。其他还有把二值模式、灰度模式、彩色模式等二维模式向空间投影等快速测量的方法。

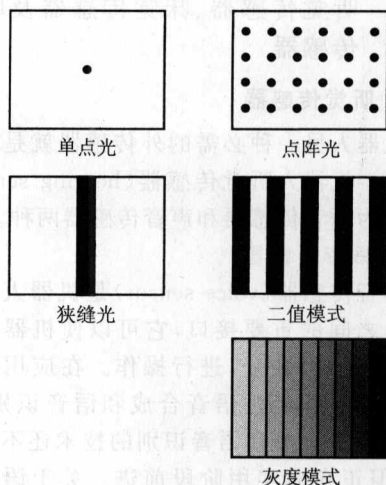


图 1.108 根据投影光投影的模式

主动型传感器的最大优点是很容易得到解决对应点的搜索问题,这在被动型中是相当困难的。以单点光为例,根据投影器的方向立即就可以判断摄像机所拍摄的点像将被投影的方向。但是主动型传感器的缺点是激光投射器的输出大小受到安全的限制,不能照射得很远,因此测量范围也就被限制在传感器的附近(通常数米到 10m 的范围)。如果采用红外线或可视光时,还会受到太阳光的干扰,因此它在室外使用比较困难。

主动型传感器也有仿照超声波原理测量往复传播时间的方法。对于光波来讲,它的速度比超声波快得多,因此直接测量光线的传播时间会有一些困难。于是,人们想到将激光调制后再照射出去,测量调制信号与接收信号的变调信号之间的相位差即可求出物体的距离^[132]。这种方法的测量精度一般为数毫米至数厘米,测量范围一般为数十厘米至数十米,甚至在屋外也可以使用,但是一般价格较高,要进行三维测量时要求对激光束进行二维扫描。

其他还有一些光学测距的方法,如根据照射光到达物体后返回的光强度求算距离的方法^[133]。显然,离物体越近,返回光的强度就越强,反之就越弱,因此可以用于距离测量。不过实际上,由于受到对象物体颜色和光反射特性等的影响很大,这种方法很难满足定量测量的要求,检测的范围一般仅数十厘米。

大矢晃久

1.3.6 听觉传感器、味觉传感器及嗅觉传感器

1. 听觉传感器

机器人另一种必需的外传感器就是听觉传感器。机器人听觉传感器(hearing sensor)可以分为语音传感器和声音传感器两种。

1) 语音传感器

语音传感器(voice sensor)是机器人和操作人员之间的重要接口,它可以使机器人按照“语言”执行命令,进行操作。在应用语音感觉之前必须经过语音合成和语音识别,目前有关语音合成和语音识别的技术还不十分完备,但正在向实用阶段前进。关于语音合成和语音识别的问题将在第4篇“智能化技术”中进行详细介绍,本节仅参照人的听觉,介绍语音向电信号的变换及预处理问题。

我们首先来看看人耳的结构和语音处理的原理。图1.109给出耳廓、外耳和内耳的结构示意。从各个方向传来的声音,经过耳廓反射导入外耳,引起鼓膜振动,这时,由于声音传入左右耳时有时间差,加上耳廓的非对称性使反射声波产生微妙的变化,结果可以完成声源的定位。

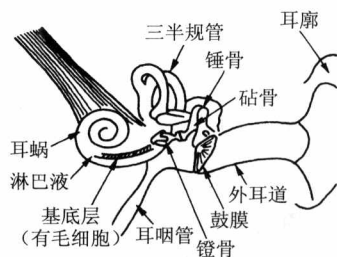


图 1.109 人类的听觉系统结构

鼓膜的振动经过三块骨头传到基底膜,并产生行波传至耳蜗。基底膜的结构特点是从入口向深处其厚度和宽度变薄变细,共振频率发生改变。因此,声波范围内的频率高低造成基底膜最大振动强度位置的变化,经过毛细胞检测基底膜上出现的振动并产生神经脉冲,就可以进行频率分析。

语音属于20Hz~20kHz的疏密波,工程上用空气振动检测器作为听觉器官,“话筒”就是典型实用例子之一,至今人们已开发出各种各样的语音传感器产品^[134]。

图1.110介绍了一些语音传感器的结构。

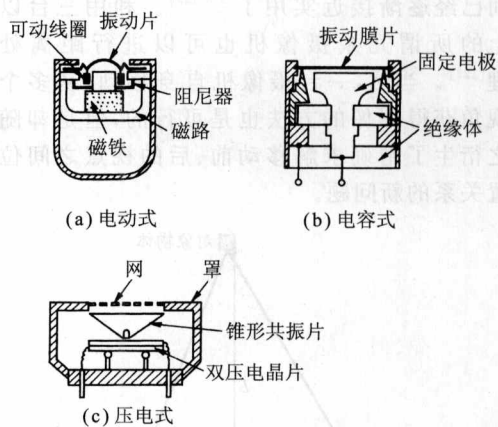


图 1.110 话筒结构图

(1) 电磁式(电动式) 它由可动线圈和磁铁构成,也称为动态话筒。其特点是失真小、稳定、阻抗低(图1.110(a))。

(2) 静电式(电容式) 它由振动膜片和固定膜片构成电容,它的动态范围大,体积小(图1.110(b))。

(3) 压电式 用晶体或陶瓷(钛酸钡等材料)作为变换元件,灵敏度高、体积小,一般将其用作超大型的声波传感器(图1.110(c))。

(4) 其他类型 用电阻丝或碳粉制作,或者利用光强变化等原理制作。

在工业生产中,为了感知听觉,控制器经常带有话筒,移动机器人的场合也可以将它安装在机器人的本体上。就机器人听觉传感器的具体要求而言,除了体积小、质量轻之处,频率特性和灵敏度也是很重要的指标。

语音信号转换成电信号后,要对其进行种种预处理,预处理包括信号放大、除去噪声(滤波)、频率分析等。信号放大和噪声滤波一般在模拟电路中进行,然后将信号进行模数转换,用数字信号处理的方法进行频率分析,频率分析通常借助于快速傅里叶变换(FFT)方法。

2) 声音传感器

下面介绍声音传感器(acoustic sensor)。声波及超声波虽然传播的速度比较慢(在20℃空气中为334m/s),但由于其容易产生和检测,因此在各种测量中应用起来很方便。除特殊情况外,一般声音测量用途的均采用超声波频段(从可听频率的上限到300kHz,个别的可达数兆赫[兹])。

把电信号转换成超声波(发射器)信号,或者把超声波变成电信号(接收器),可以使用基于电致伸缩、压电、磁致伸缩、电动、静电等原理的各种元件。如果能将信号分离开来,发射和接收最好使用一个元件,用得最多的元件还要属压电元件。

超声波测量法有被动测量法(只接收声波)和主动测量法(发射超声波后接收反射波),本节主要介绍它们在测量领域中的应用。

(1) 超声波结构探测 用超声波进行三维扫描,对反射波或透射波加以分析,从中可以提取图像,得到断层的信息。这种方法已经应用在医疗诊断等医用电子学领域。

(2) 声发射(AE) 金属或其他材料发生变形或破坏后,伴随相应弹性能量变化导致的种种物理现象,可以接收到超声波,从超声波的信号模式可以推断材料的状态。这个现象可以用于机床刀具磨损检测和材料的无损探伤等场合。

2. 味觉传感器

机器人一般不具备味觉(taste sensor)。但是,海洋资源勘探机器人、食品分析机器

人、烹调机器人等则需要用味觉传感器进行液体成分的分析。

关于人的味觉感知的基本原理和相关传感器的结构研究正在开展之中^[138],对来自味觉细胞(对特定味觉成分起反应的细胞)的组合信号的分析,使人类的味觉得以判断微妙的味道。图1.111给出人舌味觉的部分结构,几十个味觉细胞集中在一起组成味蕾,当液体状物质到达舌头的时候,味蕾感知各种味道。味觉细胞中有称为微绒毛的突起,它们能感知味道的化学成分,并刺激味神经。

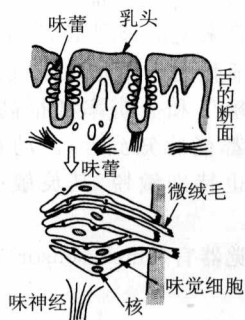


图 1.111 人类味觉的结构

根据生存的需要,鱼和昆虫的味觉分布在身体上的各个部分,鱼的体侧就分布着很多味觉传感器,而有些昆虫为了采蜜和寻觅食物的方便,在足上有味觉传感器。

味道有甜、咸、苦、酸、香味五要素,复杂的味道都是由这五种要素组合而成的。目前已经开发了很多种味觉传感器,用于液体成分的分析 and 味觉的调理,尽管它们不是特地为机器人研制的。还有一些传感器可以用于有毒成分和未知物质的检测,这些传感器使用了下列元件。

① 离子电极传感器(两种液体位于某一膜的两侧,检测所产生的电位差)。

图1.112给出工程意义上的味觉传感器的原理图,它把来自多个离子电极的信号加以合成从而识别味觉。

② 离子感应型FET(在栅极上面覆盖离子感应膜,靠浓度检测漏电流)。

③ 电导率传感器(检测液体的电导率)。

④ pH传感器(检测液体的pH)。

⑤ 生物传感器(提取与特定分子反应的生物体功能,固定后用于传感器)。

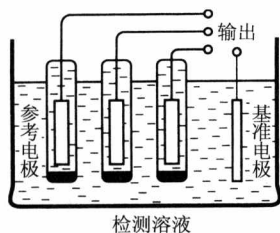


图 1.112 工程意义上的味觉传感器

3. 嗅觉传感器

嗅觉传感器(smell sensor)并不是机器人的通用感觉传感器,不过对于火灾发现/消防机器人、救援机器人、食品检查机器人、环境保护机器人等来说应该是必备的。人类鼻腔内部的嗅觉细胞的作用是识别气体。它对感觉气体的灵敏度和分辨率都很高,连极微量的物质成分都能感知到^[139]。动物和昆虫对气体的感知也特别敏锐,其灵敏度甚至高于人类几千倍。

人的嗅觉器官(smell sensor)的结构如图 1.113 所示。

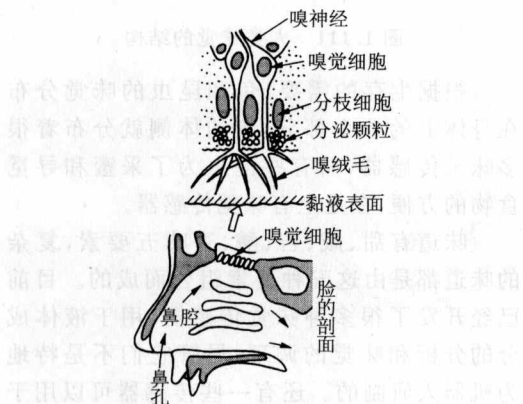


图 1.113 人类的嗅觉结构

嗅觉细胞在鼻黏膜上,能判别所吸附的嗅味的种类,鼻腔后部黏膜上被称为嗅上皮的地方有嗅细胞,嗅细胞本身也属于神经细胞,它的感受部分的形状和性质各异,对嗅味具有选择性,在大脑中实现各种成分的组合,最终判别出嗅味。

人们认为嗅味有多种基本成分,它们可以组合成各种特别的嗅味。嗅味的浓度不同,感觉也大不一样,在考虑人的嗅觉时必须注意这个特点的影响。

工程中制作嗅觉传感器的材料,一般要放上几种能吸附气体的材料,如陶瓷、半导体

等,检测它们电阻的变化或振动频率的变化,然后综合起来辨别嗅味。也有的传感器是采用对气体有敏感性的生物材料,即所谓的生物嗅觉传感器。下面,介绍几个典型的嗅觉传感器的原理。

① 水晶振子嗅觉传感器(在水晶振子电极表面上覆盖脂质膜,该层膜在吸附嗅觉成分后,能检测出振动频率的变化)。

② 半导体嗅觉传感器(半导体聚合体表面是否吸附了嗅觉成分,能呈现出电阻的变化)。

③ 热式嗅觉传感器(在加热金属的表面,嗅觉物质发生氧化还原反应引起电阻的变化)。

图 1.114 中是工程意义上的嗅觉传感器的组成结构,放置多个能与不同气体成分发生反应的传感器元件,把它们合成起来识别嗅觉。

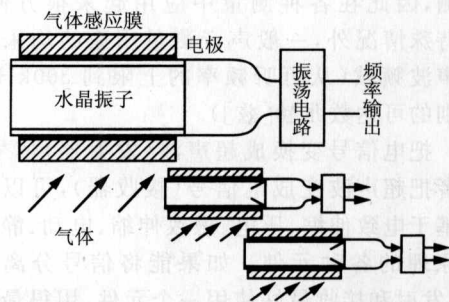


图 1.114 工程意义上的嗅觉传感器的组成

列举机器人领域的例子来进行说明。对于在大量烟雾、火焰、有害气体环境中作业的火灾救援机器人,气体识别传感器特别重要。另外,在与人类共存的空间中工作的机器人,对空气状况(氧气、二氧化碳含量等),包括对温度、湿度的检测也是必不可少的。洁净室用机器人应该具备检测灰尘的功能,这也属于嗅觉范畴之内。

1.3.7 特殊传感器

除以上介绍的传感器之外,机器人还需要其他各种传感器,本节将列举几种保护机械设备、确保安全的感觉传感器来加以说明。

1. 平衡觉传感器

步行机器人以及在特殊环境下作业的机器人有时需要平衡感觉,即保持本体姿态稳

定的传感器。人类是通过三半规管起到平衡作用的。在图 1.109 所示的耳的结构中,有沿三维方向呈轮环状的三半规管,中部的绒毛和前部的耳石充满淋巴液。这个构造能检测各个方向的转动加速度,对身体的平衡状态加以调节。

2. 痛觉传感器

痛觉是当人类的皮肤或肌肉受到过大的力,或者被损伤时感到疼痛的一种感觉,它的接收器就是自律神经末梢。此外,还有内脏疼痛的感觉等。痛觉传感器的作用就是保护身体。

机器人不直接感觉疼痛,而是当触觉或力觉检测值超过它们的许用值时,输出异常或危险的报警信号。当结构体及齿轮、传动带等传动机构和电机处于过载状态时,检测相关信息可以起到保护机器的作用。下面介绍的温度传感器也具有保护机器设备的作用。

3. 温度传感器

温度传感器(temperature sensor)是用来测定环境温度或机器人本体温度的传感器。根据检测的方法和使用元件的不同可以分为以下几种:

1) 电阻温度传感器

利用金属或电阻体随温度变化引起电阻变化的特性检测温度的传感器。一般来说,温度升高,金属的电阻也增大。随温度变化的电阻变化率叫做温度系数,单位是 $\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。常用温度传感器的金属材料 and 温度系数分别为:白金($0.0028\Omega/^{\circ}\text{C}$)、镍($0.0064\Omega/^{\circ}\text{C}$)、铜($0.0043\Omega/^{\circ}\text{C}$)等。

2) 热敏电阻

热敏电阻(thermistor)的材料是镍、钴、锰等氧化物所构成的陶瓷半导体,其原理仍是根据温度变化引起电阻变化的特性来进行检测。一般来说,温度升高,半导体的电阻有下降的趋势,这种温度系数为负的热敏电阻叫做 NTC 热敏电阻。标准的温度系数值大约是 0.045,其灵敏度达到金属的 10 倍以上。

热敏电阻作为温度传感器使用时,它的制造工艺是将两根导线埋入上面所说的金属氧化物的粉末后进行烧结,最后外层用玻璃封装,图 1.115 给出它的结构和特性^[134]。

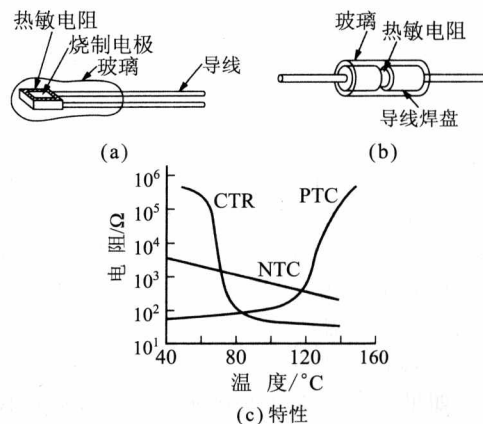


图 1.115 热敏电阻温度传感器^[134]

3) IC 温度传感器

硅晶体管的基极与发射极之间的正向 pn 结的电压是随温度变化的。把数个晶体管串联起来,检测它们电压的差异,就能得到线性度很好的温度传感器。

4) 磁温度传感器

强磁性材料具有这样的特性,即在某一固定的温度处磁性会消失而转变为顺磁性材料。这个温度称作居里温度。利用这个特性制成的传感器就是磁温度传感器。一般磁温度传感器的材料是 Mn-Zn 磁体,通过组分的改变可以将居里温度在 $-20\sim 130^{\circ}\text{C}$ 之间进行调节。

5) 红外温度传感器

以非接触的方式也可以观测物体发射的红外线,检测温度,这就是辐射温度计。通常在光传感器中使用的材料 InSb、HdCdTe 等也可以用于红外温度传感器。此外,也可以利用 PZT 或 PVDF 膜的热电效应制作红外温度传感器。

4. 湿度传感器

湿度传感器(humidity sensor)就是测定环境湿度的传感器,它有三种类型:一种叫做“陶瓷型”,利用吸附水分后导电率发生变化的原理制成;另一种叫做“高分子型”,基于水分改变介电常数的原理制成;再一种叫做“热传导型”,依据水蒸气混入气体后导热性变化的原理制成。

5. 磁传感器

磁传感器中有的用来检测与设备特定地

点的磁铁的相对位置,有的用来检测电机或线圈产生的磁场,还有的用来观测脑等的人体器官活动状况。

1) 霍尔元件

给砷化钙(GaAs)与砷化铟(InAs)等的半导体元件通电,如果沿电流的垂直方向提供磁场,会产生与磁通密度成比例的电压,这个现象称为霍尔效应,该现象被广泛地用于检测磁场的传感器。

2) 磁阻元件

如果给半导体电极施加沿垂直方向的磁场,电流方向会发生弯曲,电阻值也会出现变化,这就是基于磁阻效应的磁传感器。

3) SQUID, NMR

SQUID(Superconducting Quantum Interference Devices)是一种检测生物体内部电流现象伴生的磁场的传感器。NMR(Nuclear Magnetic Resonance)正好相反,是特地给生物体施加特定磁场,然后通过它的响应检测生物体内部信息的方法。

6. 生物传感器

生物传感器的原理在于利用生物体的各种反应机能,其主要用途是检测化学物质。对机器人而言,它主要用于味觉传感器和嗅觉传感器。

1) 酶传感器

在高分子膜上固定酶,并将它氧化成特定的化学物质,于是通过检测它分解时氧的变化量,就可以知道物质的种类。

2) 免疫传感器

免疫传感器是一种利用抗原、抗体的反应来识别抗原或抗体,检测免疫功能的传感器。

3) 微生物传感器

将特定环境下或物质中生存的微生物活体作为传感器,例如,用消耗营养素的微生物、好气性微生物等制作的传感器。

7. 微传感器

微传感器是以微加工技术为基础制作成的超小型传感器,其功能有检测光、应变、加速度等。它们不仅能用于微机械系统的传感,还可以用于生体和小型机器设备的状态检测,详细内容见第6篇2.2节。

增田良介

参考文献

1.1 传感器的基本工作原理和分类

- [1] 木下: 触覚センサの開発現状, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.5 (1984) pp.430-437
 - [2] 増田: FA用メカトロニクス要素技術 (FA用センサ), 電気学会雑誌, Vol.104, No.5 (1984) pp.337-340
 - [3] 増田: ロボットセンシングの研究開発, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.2 (2003) pp.141-144
 - [4] 西原: 静電容量型傾斜角センサ, 精密工学会誌, Vol.54, No.8 (1988) pp.1487-1489
 - [5] 木下: ホール素子を用いた圧覚センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.2 (1984) pp.181-183
 - [6] J. Rebman and K. A. Morris: A Tactile Sensor with Electrooptical Transduction, Proc. of 3rd RoViSec (1983) pp.341-347
 - [7] 篠田, 安藤: 3次元構造をもつ触覚センサ, 電気学会研究会資料, ST-91-19 (1991) pp.69-78
 - [8] 岡田, 鈴木, 稲村: 浮動英を用いた触覚センサの力学情報の抽出, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.2 (1995) pp.277-284
 - [9] 山田: ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.6 (2000) pp.473-480
 - [10] 岡田: 光電式近接距離計, 電子通信学会論文誌, Vol.J 63 C, No.10 (1980) pp.700-707
 - [11] 増田, 長谷川: 位相情報に注目した光学的距離センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.9 (1981) pp.37-78
 - [12] 岡田: 作用力方向検出の一原理, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.3 (1982) pp.309-311
 - [13] 岡田: 投影像を用いた全作用力方向の検出, 計測自動制御学会論文集, Vol.19, No.3 (1983) pp.258-265
 - [14] 岡田, 木村, 三村: フロート型平衡覚センサの基礎的考察, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4 (1999) pp.587-594
 - [15] Web Site, <http://www.measurand/products/ShapeTape.html>
- #### 1.2 内传感器
- [1] 日本規格協会: JIS ハンドブック産業用ロボット, 日本規格協会 (1987) p.18
 - [2] 大島康次郎ほか: サーボセンサの基礎と応用 (第1版), オーム社 (1988) p.100
 - [3] オムロン: ベスト制御機器カタログ
 - [4] 岩金孝信ほか: レゾルバを用いたダイレクトドライブ用高分解能位置検出について, 電学論, Vol.109-D, No.1 (1989) pp.57-63
 - [5] キヤノン: レーザーロータリーエンコーダカタログ
 - [6] 森本正治ほか: 導電性ゴムを応用したフレキシブル関節角度計, 医用電子と生体工学, Vol.24, No.3 (1986) pp.39-43
 - [7] 神谷好承: ロボットの高速化・高精度化, 精密機械, Vol.51, No.11 (1985) pp.2014-2019
 - [8] S. Futami et al.: Vibration Absorption Control,

- of Industrial Robot by Acceleration Feedback, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. IE-30, No.3 (1983) pp.299-305
- [9] 森本喜隆：モーダルアナリシスを利用した産業用ロボットの高速運動制御，自動化技術，Vol.19, No.7 (1987) pp.127-132
- [10] Keiji Jono et al.: An electrostatic servo-type three-axis silicon accelerometer, Meas, Sci, Technol., Vol.6 (1995) pp.11-15
- [11] 岡田和廣：3軸加速度センサ，計測技術1月号 (1997) pp.50-53
- [12] 太田憲，小林一敏：加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測，計測自動制御学会論文集，Vol.30, No.12 (1994) pp.1442-1448
- [13] Nabid Yazdi et al.: Micromachined Interferential Sensors, Proc. of the IEEE, Vol.86, No.8 (1998) pp.1640-1657
- [14] ロボット工学ハンドブック初版 (1990) p.71
- [15] F. Rudolf et al.: Silicon microaccelerometers, Tech. Dig. 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'87) (1987) pp.376-379
- [16] P. W. Barth et al.: A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection, Tech. Dig. Solid-State Sensors and Actuators Workshop (1988) pp.35-38
- [17] Sangchoon Ko et al.: An Electrostatic Servo Accelerometer with mG Resolution, T. Iee Japan, Vol.119-E, No.7 (1999) pp.368-373
- [18] 片岡照栄ほか：センサハンドブック (第1版)，培風館 (1986) p.457
- [19] Nabid Yazdi et al.: Micromachined Interferential Sensors, Proc. of the IEEE, Vol.86, No.8 (1998) pp.1640-1657
- [20] 池田恭一，前中一介：機械振動・共振を利用したセンサ技術，電学論，Vol.120, No.3 (2000) pp.87-92
- [21] E. J. Post: Sagnac Effect, Reviews of Modern Physics, Vol.39, No.2 (1967) pp.475-493
- ### 1.3 外传感器
- [1] 宮田隆：眼が語る生物の進化，岩波書店 (1996)
- [2] 小田幸康，西田孝：光の科学，朝倉書店 (1985)
- [3] 乾敏郎：視覚情報処理の基礎，サイエンス社 (1990)
- [4] 富永佳也：昆虫の脳を探る，共立出版 (1995)
- [5] デビッド・マー (乾ほか訳)：ビジョン，産業図書 (1987)
- [6] J. C. Eccles (伊藤訳)：脳の進化，東京大学出版会 (1990)
- [7] 村上元彦：どうしてもものが見えるのか，岩波書店 (1995)
- [8] 田口剣申：超格子アバランシェフォトダイオードの最近の進展，応用物理，Vol.63, No.9 (1994) pp.911-914
- [9] 藤田豊巳，出澤正徳：新型半導体像位置検出素子 (PSD) とその検出特性，第8回インテリジェントシステムシンポジウム (1998) pp.177-180
- [10] 松長誠之：CCDカメラの可能性，映像情報インダストリアル (1998) pp.23-26
- [11] 川人祥二：演算機能集積化 CMOS イメージセンサの展望，応用物理，Vol.67, No.1 (1998) pp.39-43
- [12] 相澤清晴ほか：イメージセンサ上での動画像圧縮，映像情報メディア学会誌，Vol.51, No.2 (1997) pp.270-273
- [13] 寺西信一，小田直樹：赤外線イメージセンサの最近の技術動向，映像情報メディア学会誌，Vol.51, No.2 (1997) pp.156-161
- [14] 新田嘉一，小守伸史，久間和生：人工網膜チップ，三菱電機技報，Vol.72, No.9 (1998) pp.6-9
- [15] K. Kyuma, E. Lange, J. Ohta, A. Hermanns, B. Banish and M. Oita: Artificial Retina - fast, versatile image processors -, Nature, Vol.372, No.6502 (1994) pp.197-198
- [16] 久間和生，田中健一，太田淳，田井修市，岩附守：人工網膜チップの開発と事業化，応用物理，Vol.67, No.4 (1998) pp.424-430
- [17] 船津英一，新田嘉一，村尾文秀，田中健一，久間和生：人工網膜 LSI とその応用システム，映像情報メディア学会誌，Vol.53, No.2 (1999) pp.178-183
- [18] 小室孝，鈴木伸介，石井抱，石川正俊：汎用プロセッシングエレメントを用いた超並列・超高速ビジョンチップの設計，電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J 81-D-I, No.2 (1998) pp.70-76
- [19] 石川正俊，小室孝：ディジタルビジョンチップとその応用，電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J 84-C, No.6 (2001) pp.451-461
- [20] 小室孝，石井抱，石川正俊，吉田淳：高速対象追跡 Proc. of the AIAA/NASA Conf. on "Smart" Sensors (1978) pp.275-304
- ビジョンチップ，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J 84-D-II, No.1 (2001) pp.75-82
- [21] 安藤繁，中村拓哉，坂口隆明：超高速時間相関検出型イメージセンサ，電気学会研究会資料，SSA-96 (1996) pp.429-434
- [22] 来海暁，安藤繁：時間相関型イメージセンサの開発とその応用，画像ラボ，Vol.12, No.8 (2001) pp.11-17
- [23] 松山隆，久野義徳，井宮淳：コンピュータビジョン，新技術コミュニケーションズ (1998)
- [24] 谷内田正彦：ロボットビジョン，昭晃堂 (1990)
- [25] 金出武雄，蚊野浩，木村茂：ビデオレートステレオマシンの開発，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.2 (1997) pp.261-267
- [26] 丸山稔，阿部茂：ランダムな切断をもつスリットパターン投影による形状計測，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J 71-D, No.12 (1988)
- [27] S. B. Kang, J. A. Webb, C. L. Zitnick and T. Kanade: A Multibaseline Stereo System with Active Illumination and Real-time Image Acquisition, Proc. ICCV (1995)
- [28] 佐藤宏介，井口征士：液晶レンジファインダー液晶シャッタによる高速距離画像計測システム，電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J-71-D, No.7 (1988)
- [29] 服部数幸，佐藤幸男：スキャン式符号化法による小

- 型高速レンジファインダ, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J 76-D-II, No.8 (1993) pp.1528-1535
- [30] 反町誠宏: アクティブ距離センサ, 第5回産業における画像センシング技術 (1990)
- [31] 中澤和夫: 非点収差ビームアレイ投光器による3次元視覚センサの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7 (1992) pp.936-941
- [32] 塚本社輔, 呉本堯, 古賀和利, 三池秀敏: 階層化位相シフト法による高精度な奥行き計測, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J 83-D-II, No.9 (2000) pp.1962-1965
- [33] 藤本公三, 黒木英一, 松永知也, 中岡久, 仲田周次: レーザスリット光走査による電子格子モアレ縞画像の形成と簡易凹凸判定, ロボット学会誌 Vol.7, No.2 (1989)
- [34] 吉澤徹: 光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ (1993)
- [35] 吉富健一郎, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生: ラインレーザを用いた仮想格子モアレ法による三次元形状測定, 精密工学会誌, Vol.66, No.3 (2000) pp.441-445
- [36] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990)
- [37] R. A. Jarvis: A laser time-of-flight range scanner for robot vision, IEEE Trans. on PAMI, Vol. 5, No.5 (1983) pp.505-512
- [38] D. Nitzan, A. E. Brain and R. O. Duda: The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis, Proc. IEEE, Vol. 65, No.2 (1977) pp.206-219
- [39] 橋本学, 羽下哲司, 鷲見和彦: 低解像度距離画像と濃淡画像を用いた物体移載ロボット用視覚システムの構築, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J 84-D-II, No.6 (2001) pp.985-993
- [40] M. Hashimoto and K. Sumi: 3-D Object Recognition Based on Integration of Range Image and Gray-scale Image, Proceeding of 12th British Machine Vision Conference (2001) pp.253-262
- [41] 弓場芳治, 平井宏, 堤喜代司, 小澤聡: 投影された市松格子パターンのステレオ視による距離計測, テレビジョン学会誌, Vol.43, No.1 (1989)
- [42] Gang Xu, Hideki Kondo and Saburo Tsuji: A Region-Based Stereo Algorithm, Proc. IJCAI (1989)
- [43] J. Takeno, K. Sakai and S. Hattiyama: Stereovision for Real-Time Measurement of the Depth of Non-Contrastive 3-D Space by Projecting Random Patterns, Engineering Systems with Intelligence, Kluwer Academic Publishers (1991) pp.341-348
- [44] 福田, 小川: 人体の解剖生理学, 南山堂 (1957) p. 296
- [45] 渡辺茂監修: 産業用ロボットの技術, 日刊工業新聞社 (1980) p.117
- [46] 井上博充ほか: 高密度に配列されたロボットの触覚, 第14回自動制御連合講演会前刷 (1971) p.3007
- [47] 中野栄二ほか: 感覚を有するハンドとインタフェースの試作, 第16回自動制御連合講演会前刷 (1973) pp.299-300
- [48] 木下源一郎: ホール素子を用いた圧覚センサ, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.2 (1983) pp.89-91
- [49] 西田, 木村: 触覚ハンドによる挿入技術の開発, 昭和58年精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1983) p.626
- [50] P. Dario et al.: Tactile sensors and the gripping challenge, IEEE Spectrum, August (1985) pp.46-52
- [51] 森下春雄: TDI 触覚センサの特性と特長, 省力と自動化, Vol.18, No.3 (1987) pp.46-48
- [52] P. Dario et al.: Piezoelectric Polymer Matrix Sensor for the Measurement of Foot-ground Vertical Force Distribution, Proc. of 4th Mediterranean Conf. on Medical and Biological Engineering (1986) pp.394-397
- [53] 増田, 長谷川: 工業ロボットのすべり覚とその応用, 電気学会論文誌 C, Vol.98, No.305 (1976)
- [54] 増田良介ほか: 工業用ロボットのすべり感覚器, 第11回 SICE 学術講演会 (1972) pp.469-470
- [55] A. K. Bejczy: Smart Sensors for Smart Hands, Proc. of the AIAA/NASA Conf. on "Smart" Sensors (1978) pp.275-304
- [56] R. Tomovic et al.: Multifunctional Terminal Device with Adaptive Grasping Force, Automatica, Vol.11 (1975) pp.567-570
- [57] 三井, 増田: すべり提示機能をもつロボットハンド操作デバイス, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 (2003)
- [58] M. Ueda et al.: Tactile Sensors for an Industrial Robot to Detect a Slip, Proc. of 2nd Int. Conf. on Industrial Robots (1972) pp.63-76
- [59] A. C. Kak et al.: Sensors for Intelligent Robots, Handbook of Industrial Robotics (ed. S. Y. Not), John Wiley (1985) p.222
- [60] J. A. Purbrick: A Force Transducer Employing Conductive Silicone Rubber, Proc. of 1st Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls (1981) pp.73-80
- [61] W. D. Hillis: A High Resolution Image Touch Sensor, The Int. J. of Robotics Research, Vol.1, No. 2 (1982) pp.33-44
- [62] 石川正俊ほか: パターン処理機能を内蔵した並列処理型触覚センサ, 第26回計測自動制御学会学術講演会 (1987) pp.587-588
- [63] J. M. Vranish: Magnetoresistive Skin for Robots, Proc. of 4th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls (1984) pp.269-284
- [64] K. A. Morris: Tactile Sensing for Automated Assembly, Lord Library of Technical Articles, LL-1201 (1985)
- [65] A. K. Bejczy: Robot Sensing and Controls, Tutorial Handout, 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation
- [66] 朴致用ほか: 光導波板を用いた分布型触覚センサ, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.4 (1987) pp.31-38
- [67] D. H. Mott et al.: An Experimental Very High

- Resolution Tactile Sensor Array, Proc. of 4th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls (1984) pp.241-250
- [68] 前川仁ほか：半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発，計測自動制御学会論文集，Vol.30，No.5 (1994) pp.449-508
- [69] E. S. Kolesar et al. : Multiplexed Piezoelectric Polymer Tactile Sensor, J. of Robotics Systems, Vol.9, No.1 (1992) p.37
- [70] B. L. Huchings et al. : Multiple Layer Cross-Field Ultrasonic Tactile Sensor, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics Automation (1995) pp.2522-2528
- [71] H. Shinoda et al. : Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics Automation (1997) pp.3087-3092
- [72] グローブスキャンシステム，ニッタ (株) (2002) <http://www.nitta.co.jp/products/sensor/index.htm>
- [73] S. Sagisawa et al. : Three Direction Sensing Tactile Sensor, Proc. of 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '88) pp.47-51
- [74] 大岡昌博ほか：光学式マイクロ三軸触覚センサの試作，日本機械学会論文集 C, Vol.66, No.650 (2000) pp.3344-3351
- [75] 増田良介：センシング技術，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.7 (2001) pp.7-10
- [76] 石川正俊ほか：感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心位置の測定方法，計測自動制御学会論文集，Vol.18, No.7 (1982) pp.730-735
- [77] M. H. Raibert et al. : Design and Implementation of a VLSI Tactile Sensing Computer, The Int. J. of Robotics Research, Vol.1, No.3 (1982) pp.3-18
- [78] 篠田裕之：接触センシングの現状と今後の展開，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.4 (2002) pp.35-38
- [79] Y. Yamada et al. : Artificial Finger Skin having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (2001) pp.686-691
- [80] 神山和人ほか：触覚カメラ—弾性を持った光学式3次元触覚センサの作成，電気学会論文誌 E, Vol.123, No.1 (2003) pp.16-23
- [81] 増田：機械制御のためのセンサ技術入門，近代図書 (1984) pp.70-78
- [82] 小野：6軸力センサ，精密工学会誌，Vol.52, No.4 (1986) pp.33-36
- [83] A. Pugh : Robot Sensors-tactile and Non-vision, IFS Publications (1986) pp.3-38
- [84] 内山：特異値分解によるロボット力覚センサの構造と評価，日本ロボット学会誌 Vol.5, No.1 (1987) p.4
- [85] P. Watson et al. : Method and Apparatus for Six Degrees of Freedom Force Sensing, US Pat. No. 4094192 (1978)
- [86] M. Gerresheim : Instrument Hub for the Measurement of Forces and/or Moments. U.S.Pat. No.3867838 (1975)
- [87] A. C. Staugaard : Robotics and AI, 8.Tactile Sensing (1987) pp.298-310
- [88] G. Piller : Captures de force pour robots industriels, Bull. SEV/VSE 74 (1983)
- [89] 畑村ほか：ロボット用6軸力計の試み，日本機械学会論文集 C, Vol.54, No.497 (1988) pp.241-246
- [90] 増田：初めてのセンサ技術—力覚センサの構造—，工業調査会 (1998) pp.87-89
- [91] 広瀬，米田：光学式変位センサと力センサ，日本ロボット学会誌 Vol.9, No.7 (1991) pp.910-911
- [92] ビー・エル・オートテック (株)：ビーエル・センサ (力覚センサ) 資料 (2003)
- [93] 出澤：ロボットののための距離検出法，計測と制御，Vol.26, No.2 (1987) pp.103-110
- [94] 中森，籠宮：静電容量式変位計の特性改善，SICE '87 (1987-7) pp.637-638 ; J. Etherton : Consideration on Using Capacitance Proximity Sensing (CPS) to Protect Machine Maintenance Workers, Maintenance Management International, 5, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1985) pp.26-268
- [95] 市ノ川：走査型トンネル顕微鏡による表面観察，応用物理，Vol.24, No.5 (1986) pp.682-686
- [96] 水上：エアセンサによる位置検出，センサ技術，Vol.2, No.2 (1982) p.49
- [97] 佐々木：超音波の距離形状認識への応用，光学技術コンタクト，Vol.24, No.5 (1986) p.362 ; T. Tsujimaura, T. Yabuta and T. Morimitu : Three-dimensional shape recognition method using ultrasonics for manipulator control system, Journal of Robotic Systems, Vol.3, No.2 (1986) pp.205-216 ; 中嶋：ロボットによる経路なら作業のための超音波近接センサ，計測自動制御学会論文集，Vol.22, No.5 (1986) p.567
- [98] 田幸，辻内，南編：光学測定ハンドブック，朝倉書店 (1981)
- [99] 伊藤，久保：光ディスクメモリにおける精密サーボ，システムと制御，Vol.27, No.11 (1983) p.704
- [100] T. Okada : Development of optical distance sensor for robots, Intl. Jour. of Robotics Research, Vol.1, No.4 (1982) p.3
- [101] A. R. Johnston : Optical Proximity Sensors for Manipulators, Technical Memorandum, JPL (May 1973) pp.33-612 ; High Resolution Optical Reflective Sensor : HEDS-1000, Hewlett Packard Technical Data (1980-1)
- [102] 高田：ホトニックスセンサによる位置検出，センサ技術，Vol.3, No.2 (1982) pp.35-38
- [103] 増田ほか：位相情報に注目した光学式近接センサ，SICE 論文集，Vol.17, No.9 (1981) p.945
- [104] R. A. Jarvis : Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision, IEEE Trans. Pattern. Analysis and Machine Intelligence, PAM 1-5, 2 (1983) p.122
- [105] M. Ishii and T. Nagata : Feature extraction of three dimensional object and visual processing in a hand-eye system using laser tracker, Pattern Recognition, Vol.8 (1976) p.299

- [106] 出澤：RORSに基づく3次元計測機用光触針の構成，理研シンポジウム第8回「非接触計測と画像処理」(1987.10) pp.21-32
- [107] 出澤：1次元標点方位検出器と立体計測法，理研シンポジウム第7回「非接触計測と画像処理」(1986.9) pp.25-32
- [108] 土井：レーザ光切断法による3D物体の認識，計測自動制御学会論文集，Vol.9，No.1 (1973) p.18；Y. Shirai：Recognition of polyhedra with a range finder, Pattern Recognition, Vol.4 (1972) p.243
- [109] 馬場ほか：オンライン視覚付きアーク溶接ロボット，三菱電機技法，Vol.59，No.4 (1985) pp.21-24；玉井：アーク溶接用視覚，日本ロボット学会誌，Vol.1，No.4 (1983) pp.293-297
- [110] S. Inoluchi et al.：Range Imaging System for 3-D Object Recognition, Proc. 7th Intl. Conf. Pattern Recognition, 806 (1984)；H. Yamamoto, K. Sato and S. Inokuchi：Proc. 8th Intl. Conf. on Pattern Recognition, 1 (1986) p.233
- [111] 出澤：光学的距離センサー小型化のための一方法，日本ロボット学会誌，Vol.3，No.2 (1985-4) p.87；A. Kurahishi, M. Adachi and M. Idesawa：A prototype of optical proximity sensor based on RORS, Jour. Robotics Systems, Vol.3，No.2 (1986) pp.18-190
- [112] 塚田：工作物精度測定センサとデータ処理，日本機械学会誌，Vol.89，No.814 (1986) p.1072
- [113] 長田，下河辺：光学式非接触プローブの研究，精密機械，Vol.51，No.12 (1985) pp.109-114；光マイクログ，アンリツCAT No.46119-2
- [114] T. Kanade and T. M. Sommer：An Optical Proximity Sensor for Measuring Surface Position and Orientation for Robot Manipulation, Carnegie-Mellon University Technical Report, CMU-RI-TR-83-15；M. Fuhrman and T. Kanade：Optical proximity sensor using multiple cones of light for measurement of surface shapes, Optical Engineering, Vol.23，No.5 (1984) p.546；K. Nakamura and H. Hanafusa：A New Optical Proximity Sensor for Three Dimensional Autonomous Trajectory Control of Robot, Proc. of ICAR'83 (1983-9) pp.179-186；A. K. Bejczy：Remote Applications of Robots, Supplement ICAR '83 (1983.9) p.57
- [115] M. Idesawa and G. Kinoshita：New type of miniaturized optical range-sensing methods RORS and RORST, Journal of Robotics Systems, Vol.3，No.2 (1986) p.165；木下，出澤：ロボット用光学的距離センサの開発，SICE論文集，Vol.22，No.11 (1986) p.1204
- [116] 小関，中野，山本：画像処理技術を用いた非接触寸法測定プローブ，電子通信学会全国大会講演論文集，分冊5 (1987-3) p.225
- [117] 中沢，中島，小林：ファイバー・グレイティングを用いた3次元形状計測システムの開発，信学誌D，Vol.69-D，No.12 (1986-12) p.1929；中沢，大矢，中島，油田：ファイバー・グレイティングを用いたロボット視覚センサーの開発 (Hough変換による物体構成面の抽出)，第5回日本ロボット学会学術講演会 (1987-11) p.607
- [118] L. Kleeman and R. Kuc：An Optimal Sonar Array for Target Localization and Classification, Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1994) pp.3130-3135
- [119] K. Audenaert, H. Peremans, Y. Kawahara and J. Van Campenhout：Accurate Ranging of Multiple Objects using Ultrasonic Sensors, Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1992) pp.1733-1738
- [120] O. Bozma and R. Kuc：Characterizing the Environment Using Echo Energy, Duration, and Range：the ENDURA Method, Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1992) pp.813-820
- [121] A. M. Sabatini：Active Hearing for External Imaging Based on an Ultrasonic Transducer Array, Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1992) pp.829-836
- [122] H. Peremans, K. Audenaert and J. M. Van Campenhout：A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9，No.1 (1993) pp.36-48
- [123] 大矢晃久，永島良昭，油田信一：超音波による壁面の法線方向の高速測定，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.5 (1995) pp.118-121
- [124] 矢田晃子，大矢晃久，油田信一：高速・高精度に反射点群を計測可能なソナーリングシステム，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.8 (1999) pp.1173-1182
- [125] 丹沢勉，清弘智昭，森英雄：屋外移動ロボットのための雑音に強い超音波センサ，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.4 (1997) pp.62-69
- [126] L. Kleeman：Fast and Accurate Sonar Trackers Using Double Pulse Coding, Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1999) pp.1185-1190
- [127] 谷内田正彦：ロボットビジョン，昭晃堂 (1990)
- [128] 金出武雄，蚊野浩，木村茂，川村英二，吉田收志，織田和夫：ビデオレオステレオマシンの開発，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.2 (1997) pp.99-105
- [129] 岡田慧，加賀美聡，稲葉雅幸，井上博允：PCによる高速対応点探索に基づくロボット搭載可能な実時間視差画像・フロー生成法と実現，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.6 (2000) pp.138-143
- [130] S. Yuta, S. Suzuki, Y. Saito and S. Iida：Implementation of an Active Optical Range Sensor Using Laser Slit for In-Door Intelligent Mobile Robot, Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991) pp.415-420
- [131] 中沢和夫，大矢晃久，中島真人，油田信一：マニピュレータに装着したファイバグレイティング視覚セ

- ンサによる三次元形状計測, 電気学会論文誌C, Vol.107-C, No.7 (1987) pp.659-665
- [132] M. Herbert and T. Kanade: Outdoor Scene Analysis Using Range Data, Proceedings 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1986) pp.1426-1432
- [133] E. Cheung and V. J. Lumelsky: Proximity Sensing in Robot Manipulator Motion Planning: System and Implementation Issues, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.6 (1989) pp.740-751
- [134] 増田: 初めてのセンサ技術, 工業調査会 (1998)
- [135] 大森: 普及版センサ技術, フジ・テクノシステム (1998)
- [136] 計測自動制御学会編: 計測制御技術事典, 丸善 (1995)
- [137] 森村: 機械量センシング技術, コロナ社 (1986)
- [138] アンリツ(株)研究所: 味覚センサとは, <http://ultrabio.ed.kyushu-u.ac.jp> (2002)
- [139] 三菱プレシジョン(株): テクノロジーコラム第1回においセンサ, <http://www.mind.ne.jp/mpc/tech-no/nol/index.htm>

第2章 驱动器

2.1 电动驱动器

实现旋转运动的驱动器,可以列举出步进电机、直流(DC)电机、交流(AC)伺服电机等,下面就它们基本原理的异同点进行说明。驱动器的选择和设计在研发机器人时是至关重要的。除了这三种主要的驱动器以外,还有螺线管驱动器。

2.1.1 步进电机

图 2.1 是从步进电机(steping motor)的使用方法来定义电机的。也就是说,除了电机还有控制及驱动电路外,在控制电路中,

① 如果给电机输入一个脉冲,电机轴仅仅旋转一定的角度,称之为“一个步长的转动”。这个旋转角的理论值叫做步距角(step angle)。

② 因此,电机轴按照与脉冲频率成正比的速度旋转。

③ 电机轴在最后的脉冲位置停止,产生相对于外力的一个很强的反抗力。

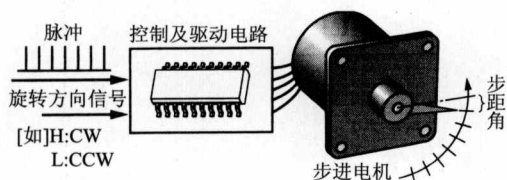


图 2.1 步进电机按使用方法的定义

下面简单地来看一下步进电机的结构和原理。回顾一下这种电机的发展^[1]可以看出,最初付诸应用的并非是永久磁铁型,而是可变磁阻型(VR: Variable-Reluctance type),不过现在的步进电机几乎都使用永久磁铁。就永久磁铁的使用方法而言可将其分为各种方式,经淘汰后目前只剩下混合型、凸极型和盘状转子型三种。

1. 混合型

混合型步进电机主要用在工业机器人

上。所谓混合(hybrid)就是根据生物学上的杂交原理,吸收雌、雄物种的优点杂交出新的物种,这个概念也用于非生物。

首先,在采用永久磁铁的结构中,图 2.2 是简单的圆柱形永久磁铁与作为定子的极齿(pole)的组合结构,它的步距角只能达到 90° 、 45° 、 22.5° 等。图 2.3 所示的 VR 型步进电机由于具有细密的齿结构,它的步距角可以达到更小,但是对其小型化后,运转效率(输入的电功率与机械动力的比值)将急剧下降。于是诞生了实现高效率、小步距角的混合型步进电机(图 2.4)。该电机的转子沿长度方向放置着圆柱形的永久磁铁,重要的是永久磁铁和其周围是带有齿的软钢结构。

转动原理:根据永久磁铁、电磁铁、铁心的

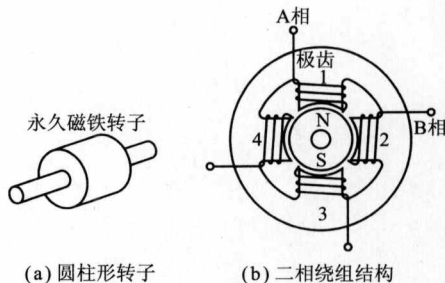


图 2.2 简单永久磁铁型步进电机

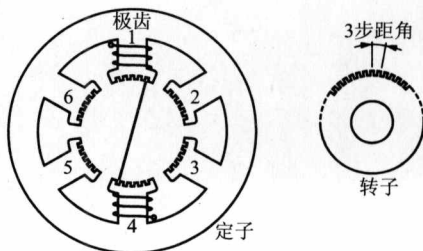


图 2.3 具有细密齿的三相绕组的 VR 型步进电机的剖面
绕组配置:极齿 1 和 4 为第一相绕组, 2 和 5 为第二相绕组, 3 和 6 为第三相绕组

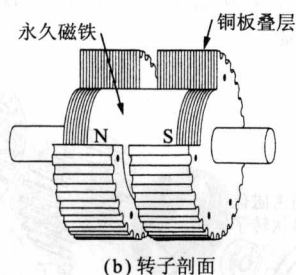
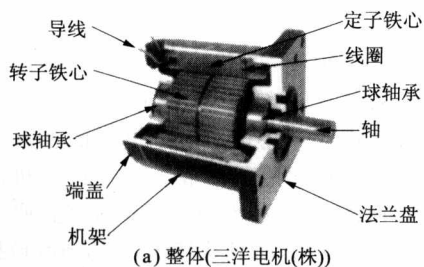


图 2.4 混合型步进电机的结构

齿周边产生的磁力线来说明混合型步进电机的转动原理最简单易懂,如图 2.5 所示。图 2.5 中给出了使 A 相或 B 相某个绕组励磁的方式(单相励磁)。图 2.5(a)中 A 相被励磁,在一个齿中永久磁铁的磁场和励磁磁场被加强,磁力线产生像伸长的橡皮筋那样很强的张力,如果这个磁力线变斜,就会产生很大的力将它拉直。因此,在这个齿处转子和定子对齐。然后进行调节,让直流电源提供的电流流向 2 组电磁铁的某一组,并合理地控制

电流流向的顺序,就能选择产生磁力线的齿,产生旋动力,导致转动,最后停止到所希望的位置。

下面,就步进电机结构中所涉及的术语和参数加以说明。

1) 定子和转子

旋转的部分叫做转子(rotor);静止的部分叫做定子(stator)。绕组设置在定子里。几乎所有的步进电机都以永久磁铁作为转子,但也有将其作为定子的。比如,2.1.4 节中的直接驱动型电机就是这样的。

2) 绕组相数(number of winding phase, 符号 m)

图 2.2 所示的永久磁铁型步进电机中,由于电源交替地向四个极的绕组供给电流,从而得到旋转运动。在极 1 和极 3 之间设置 A 相绕组,在极 2 和极 4 之间设置 B 相绕组。这样的电机就叫做二相电机。图 2.3 的 VR 型步进电机中,在三组绕组之间进行电流切换,从而产生转动,故叫做三相电机。现在的混合型步进电机有二相、三相及五相之分。二相绕组大多带有标记 A、B。五相电机驱动电路的价格较高,但响应速度快。有时二相电机也可以看作是四相,于是就成为图 2.5 所示的 A、B、 \bar{A} 、 \bar{B} 。

3) 转子齿数

混合型电机的转子呈圆柱形或盘形,永

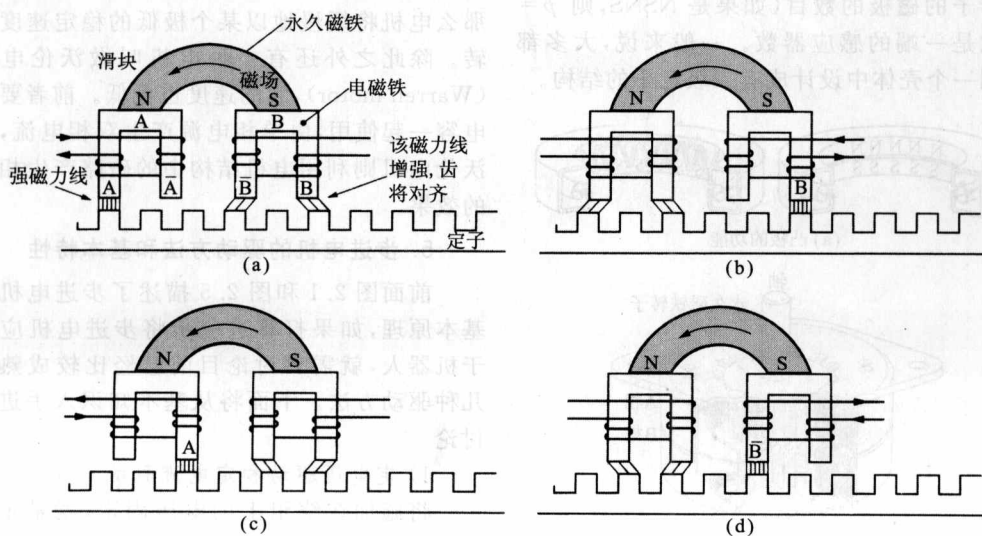


图 2.5 混合型步进电机的原理

(按照(a)→(b)→(c)→(d)的顺序,交替绕组电流,滑块向右移动)

久磁铁的两端具有软钢的齿结构。单侧圆周上齿的数目用 N_r 表示。

4) 极数(number of magnetic poles, 符号 p)

在步进电机中不大使用极数这个术语, 其实, 它是在比较 DC 伺服电机、无刷电机(AC 伺服电机)的异同点时所定义的一个术语。它取决于转子的结构或模式。混合型有: $p=2N_r$ 。

5) 极齿(pole)

极齿表示围绕在定子铁心上的大齿。它产生磁极, 但它不代表极齿本身, 它是一种机械结构。

6) 步 数

每转动一圈相当的步数叫做步数(S)。定子的相数 m 与转子的齿数 N_r 之间存在以下关系:

$$S = mN_r \quad (2.1)$$

2. 凸极型

如果想以最简单的形式来实现混合型步进电机的原理, 就可以利用图 2.6 所示的结构。混合型电机必须在每个极齿上缠绕绕组, 与之相反, 凸极型步进电机由于环状绕组和爪状(claw-pole)绕组之间能激励出 NSNS... 多个磁极, 凸极也叫做感应线圈(inductor)。转子上的永久磁铁沿着圆周被磁化成 NSNS...。这种电机也是二相电机, A 相和 B 相可以独立组装, 组装时让两相错开 $1/2$ 的齿距。极数就是转子的磁极的数目(如果是 NSNS, 则 $p=4$)或是一端的感应器数。一般来说, 大多都在同一个壳体中设计成有二级定子的结构。

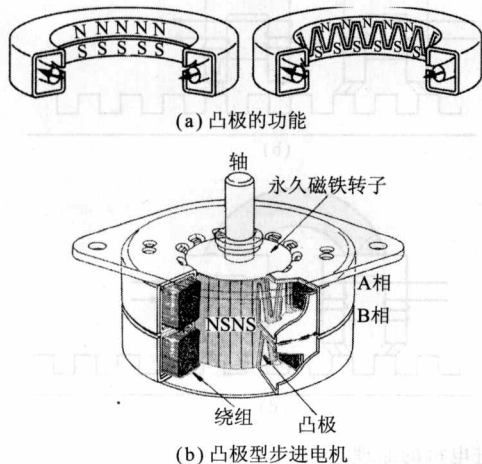


图 2.6 (a)凸极功能与(b)凸极型步进电机

3. 盘状转子型

转子采用圆盘形磁铁, 定子绕组像三明治那样从两侧夹住转子, 呈现如图 2.7 所示的夹层结构。与混合型步进电机的不同之处在于永久磁铁的磁化。混合型步进电机沿着圆柱的轴线进行单极(unipolar)磁化, 通过软钢齿形成 NSNS, 而盘状转子(disk-rotor)型步进电机则沿着圆盘磁铁的圆周实现异极(heteropolar)磁化。



图 2.7 盘状转子型步进电机的结构

4. 超低速同步电机与沃伦电机

超低速同步电机几乎与混合型步进电机有同样的结构, 如果仅仅连接单相交流电源, 那么电机将缓慢地以某个极低的稳定速度旋转。除此之外还有一种电机叫做沃伦电机(Warren motor), 它的速度也极低。前者要与电容一起使用, 由单相电源产生双相电流, 而沃伦电机则利用电机结构中的磁路产生相似的效果。

5. 步进电机的驱动方法和基本特性

前面图 2.1 和图 2.5 描述了步进电机的基本原理, 如果打算进一步将步进电机应用于机器人, 就需要讨论目前已经比较成熟的几种驱动方法。下面将从基本知识入手进行讨论。

1) 定电压驱动和定电流驱动

将施加在绕组上的电压固定, 就是定电压驱动方法。在这个方法的前提下, 提高脉冲频率, 电机就产生高速转动, 降低电流, 转矩就减小。换一种方法, 就是固定电流或让

电流按照指令值发生变化,称之为定电流驱动。此时速度越高,外加电压也自动增高,由于电流保持不变,所以不易引起转矩的减小。因此,这种驱动方式适用于高速运转。

2) 单相励磁和二相励磁

图 2.5 的转动原理就是针对 A 相或 B 相的其中一相励磁的方法。在解释步进电机原理时这样表述很便于理解,但是实际上,这会引起低频电气振动,尤其是共用壳体的凸极型步进电机在单相励磁状态下运转时,步距角的偏差很大,因此通常都采用二相励磁运转方式,即始终对 A 相、B 相同时励磁,通过控制励磁极性的组合顺序产生旋转运动。

3) 平衡点与制动位置

被励磁的电机在无载荷时停止的位置叫做平衡点或稳定点(equilibrium position),无励磁时停止的位置叫做制动位置(detent position)。

4) 定位精度

关于停止位置的精度或误差有两个概念。

(1) 步距角误差(step position error) 让转子一步步转动从某一个平衡点到达相邻平衡点时,实际转动角度与步距角的位置误差的最大值。

(2) 静止角度误差(positional accuracy)

从某一个基准点所观察到的所有稳定点与理论稳定点(步距角的整数倍)相比的偏差的最大值。

5) 保持力与停止转矩

给处于励磁状态的电机施加外力,将外力徐徐增大,当超过反力极限后电机轴就会转动。这个极限值随绕组相数的不同而不同。其最小值就是保持力(也称作最大静止转矩,holding torque),它与励磁电流有关。另外,在无励磁状态下,仅靠永久磁铁的磁力稳固位置的极限值叫做停止转矩(detent torque)。

6. 步进电机的加减速运转

步进电机从静止状态一下子用高频脉冲启动比较困难,为了使它能高速运转,如图 2.8 所示,可以通过调整脉冲间隔达到加速、等速、减速运转的目的。

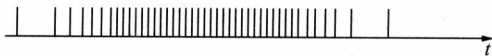


图 2.8 调整脉冲间隔实现步进电机加减速运转

2.1.2 直流(DC)伺服电机

仅用两根导线供给直流电实现驱动的电机电就是 DC 伺服电机,它的典型结构如图 2.9 所示。伺服电机的作用是提供位置和速度控制,没有什么特殊的结构。但是,要求它在很大的范围内能以平滑的速度转动。图 2.9(a)的形式是使用带齿与槽(slot)的铁心,线圈排布在槽中,大多数 DC 电机都采用这种结构。但是,在特别小的电机中,因为槽数比较少,所以脉动转矩(cogging torque)就很显著,尤其低速运行下难以稳定驱动,不宜用于伺服控制,不过却能适合机器人的控制。图 2.9(b)所示的无铁心直流伺服电机的特点是脉动转矩比较小。

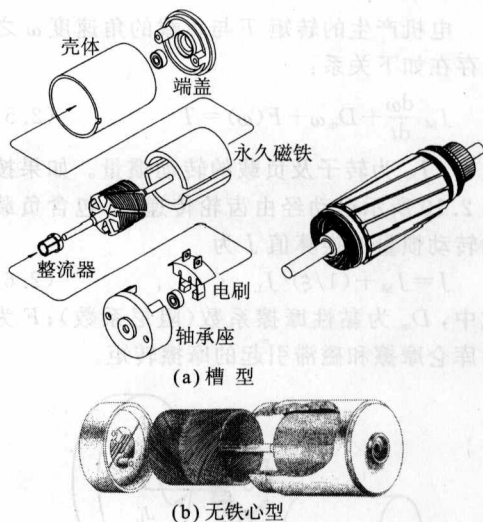


图 2.9 DC 伺服电机的结构

DC 电机最适合工业机器人的试制阶段或竞技用机器人。下面我们列举用户在使用 DC 电机伺服中应该掌握的几个重要法则。

1. 转矩与电流成比例

转矩 T 基本与电流 i 成比例,其比例常数 K_T 叫做转矩常数,即

$$T = K_T i \quad (2.2)$$

无负载电流 I_{∞} 是指为了平衡电机内部产生的机械和电磁的制动力所需要的电流。

2. 无负载速度与电压基本成比例

DC 电机轴在外力的作用下旋转,两个端子之间会产生电流,叫做反电动势。反电动势 e 与转动速度 ω 成比例,比例系数是 K_E ,于是有

$$e = K_E \omega \quad (2.3)$$

在无负载运转时,施加的电压基本等于反电动势,与转动速度成正比。

3. 转矩常数与反电动势常数

上述所定义的两个常数在电学上是同一个常数,即

$$K_T = K_E \quad (2.4)$$

在电机制造厂家的产品目录中,速度的单位常常使用每分钟的转数(r/min),所以也许会遇到与这些常数不同的值。在国际单位制(SI)中,转动速度用(rad/s)表示时,可以确认式(2.4)是成立的。

4. 运动方程式

电机产生的转矩 T 与负载的角速度 ω 之间存在如下关系:

$$J_M \frac{d\omega}{dt} + D_m \omega + F(\omega) = T \quad (2.5)$$

式中, J_M 为转子及负载的转动惯量。如果按图 2.10 所示运动经由齿轮传递时,包含负载的转动惯量的换算值 J 为

$$J = J_M + (1/\xi)^2 J_L \quad (2.6)$$

式中, D_m 为黏性摩擦系数(阻尼系数); F 为由库仑摩擦和磁滞引起的摩擦转矩。

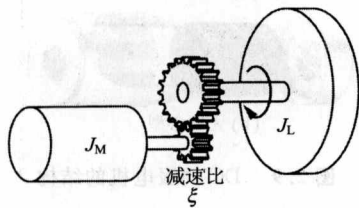


图 2.10 利用齿轮减速比调整电机与负载的组合

5. 传递函数与时间常数

DC 电机的传递函数的定义有各种各样,基本上就是角速度对电压的响应。下面就以二阶滞后型为例进行说明。

$$G(s) = \frac{1/K_E}{\tau_E \tau_M s^2 + \tau_M s + 1} \quad (2.7)$$

式中,含有电气时间常数和机械时间常数,它们由下式求解:

$$\text{电气时间常数 } \tau_E = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.8)$$

$$\text{机械时间常数 } \tau_M = \frac{J_M R_a}{K_E} \quad (2.9)$$

式中, R_a 及 L_a 分别为绕组端子之间的电阻及电感。

当带有负载时,就用式(2.6)中的 J 代替 J_M 。

如果 τ_M 比 τ_E 大 10 倍以上,就可以视 τ_E 为 0。这时,传递函数成为下面的一阶滞后型,即

$$G(s) = \frac{1/K_E}{s\tau_M + 1} \quad (2.10)$$

6. 直线特性

如果以横轴为转动速度,纵轴为转矩和电流,它们之间就有如图 2.11 所示的线性关系,不过输出 P_o 与效率 η (机械输出/电气输入)之间为曲线关系。

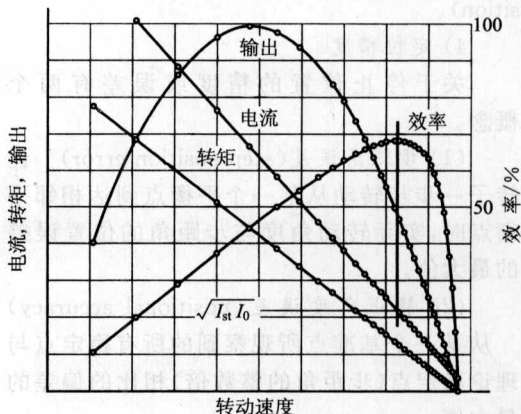


图 2.11 DC 伺服电机的直线特性与最大效率点

7. 最大效率条件

DC 电机在最大效率状态运转时,设电流为 I_M ,则有

$$I_M = (I_{st} \cdot I_{no})^{1/2} \quad (2.11)$$

也就是启动电流 I_{st} 与无负载电流 I_{no} 乘积的均方即为最大效率电流。表 2.1 给出了其他的关式。

表 2.1 最大效率时的关系式
(电刷电压为 0,忽略铁损中涡流损失)

- (1) $Q = \sqrt{I_{st}/I_{no}}$
- (2) $I_M = \sqrt{I_{st} \cdot I_{no}} = Q I_{no} = I_{st}/Q$
- (3) $\eta_{max} = \left(\frac{Q-1}{Q}\right)^2$

续表 2.1

- (4) 输入 $P_1 = QVI_{no} = (V/Q)I_{st}$
- (5) 输出 $P_O = \frac{(Q-1)^2}{Q}VI_{no}$
- (6) 铜损 $P_{co} = VI_{no}$
- (7) 铁损 $P_{IR} = (Q-1)\left(1 - \frac{Q-1}{Q}\right)VI_{no}$
- (8) $P_{co} + P_{IR} = \left(2 - \frac{1}{Q}\right)VI_{no}$
- (9) 转矩 $T = (Q-1)K_T I_{no}$
- (10) 转动速度 $\omega_M = \frac{Q-1}{Q} \frac{V}{K_E} = \frac{Q}{Q+1} \omega_0$

式中, 无负载速度 $\omega_0 = \left(1 - \frac{1}{Q^2}\right) \frac{V}{K_E}$;

转矩常数 $K_T =$ 反电动势常数 K_E 。

注: 上述关系式适合电刷无提前角的 DC 电机。同样适合在无刷电机中电感影响很小的情形。

[DC 伺服电机的运转方法] 从电气和电子技术的角度看, 在 DC 电机运转时有以下问题。

1) 线性驱动和 PWM 驱动

给电机施加电压的方法有两种: 一种是把电流或电压以模拟量的形式连续地变化; 另一种是脉宽调制方法 (PWM: Pulse-Width Modulation)。前者利用晶体管在线性区域内的特性, 故也叫做线性驱动。它是电机所希望的方式, 但是在电子电路中容易引起大量热损耗。后者在实际应用时将面临几个需要解决的技术问题。

减少晶体管或 MOSFET 等的电能损失的方法就是 PWM 方法。如果着眼于伺服电机频繁地进行正反转, 此时可以采用图 2.12 所示的脉冲电压方式。图 2.12(a) 是交替施加正电压和负电压的方式, 由于脉冲振幅很大, 所以该方式存在一些缺点, 不过在零电压附近倒是能实施平滑的控制。相反, 图 2.12(b) 中交替地施加零电压和正负电压, 结果在零电压附近容易发生不连续现象。

一般来讲, 在高频段时, 直流电机的 PWM 驱动虽然如图 2.11 那样并非呈现完全的直线特性, 但其重复性较好, 而在低频段往往发生特性与直线偏离的情况, 图 2.13 中的电路就是一例。在晶体管等的开关元件 off 时, 电流通过二极管进行循环。这

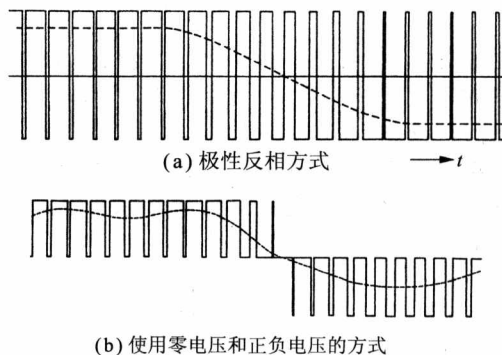


图 2.12 脉宽驱动

时, 二极管的正向电压几乎为零, 电机成为发电机, 处于短路状态并减速。如果 off 持续时间过长, 电流将消失。于是, 在二极管上将出现反电动势引起的反向偏压。结果, 电压波形与图 2.14(a) 给出的理想 PWM 相比发生畸变, 成为图 2.14(b) 所示的情形, 也就是零电压区间看上去变短了。

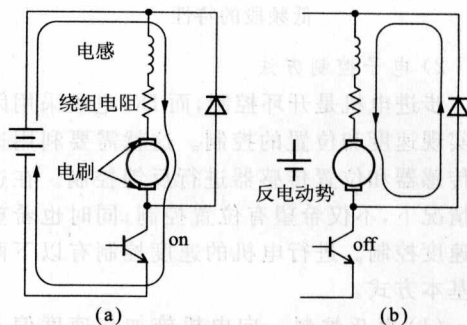


图 2.13 PWM 驱动中电压、电流、反电动势的关系

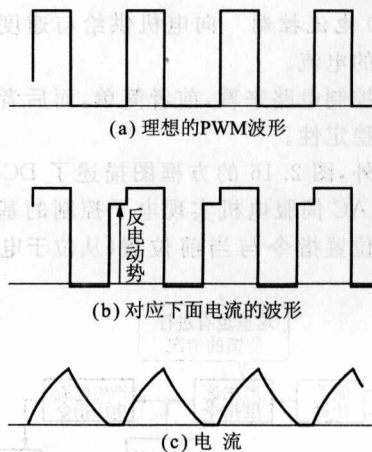


图 2.14 off 时循环电流消失的 PWM 波形

图 2.15 给出了这种情况下的特性曲线。也就是说,在低速时转矩大,速度快,转矩急速下降。频率越低,特性曲线范围越大。频率低,电机容易产生振动,一般不希望发生这样的事情,不过降低库仑摩擦可以收到改善的效果。因此,竞技机器人常采用这样的驱动。

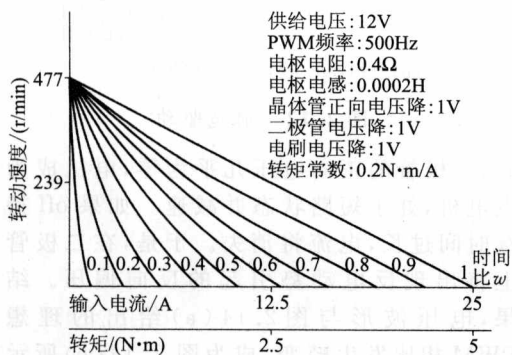


图 2.15 以图 2.14(b)方式的 PWM 驱动时低频段的特性

2) 电子控制方法

步进电机是开环控制,而 DC 电机采用闭环实现速度和位置的控制。这就需要利用速度传感器和位置传感器进行反馈控制。在这种情况下,不仅希望有位置控制,同时也希望有速度控制。进行电机的速度控制有以下两种基本方式。

(1) 电压控制 向电机施加与速度偏差成比例的电压。

(2) 电流控制 向电机供给与速度偏差成比例的电流。

从控制电路来看,前者简单,而后者具有较好的稳定性。

另外,图 2.16 的方框图描述了 DC 伺服电机和 AC 伺服电机实现电子控制的基本方案。把位置指令与当前位置(从位于电机的

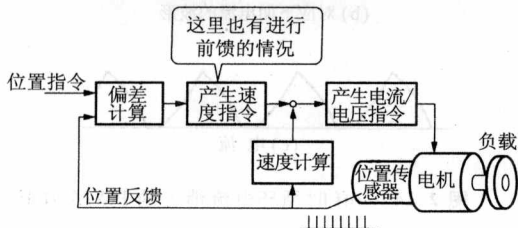


图 2.16 以 DC 电机或无刷电机的位置控制方案

旋转编码器获得的脉冲数)的差叫做位置偏差,根据位置偏差产生电机的速度指令。步进电机与 DC 电机的相似之处在于控制上都属于累计误差脉冲(accumulated error pulse)控制,其原理如图 2.17 所示。如同步进电机一样以脉冲序列给定位置指令。累计误差脉冲产生实际的速度命令,但是,由于启动瞬间到达产生累计误差脉冲需要花费一定的时间,所以出现了速度调整等各种技术。

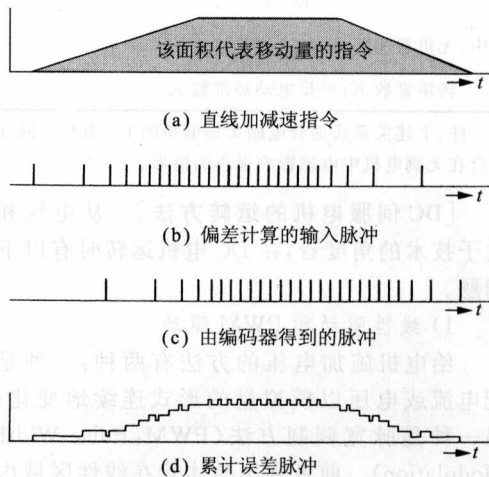


图 2.17 与步进相同的累计误差脉冲控制

(a)是基本的理想速度指令,从(b)的输入脉冲数中减去由(c)的编码器返回的脉冲数,结果得到(d)的累计误差脉冲数

在 DC 电机或无刷电机的性能极限范围内进行加速、等速、减速控制,这与累计脉冲方式或其改进方式存在不同之处。此时不如说是以位置偏差的平方根作为速度指令更恰当(图 2.18)。图 2.18(b)中给出了减速时的位置偏差 ϵ 、加速度 β 、速度 ω 之间的关系,

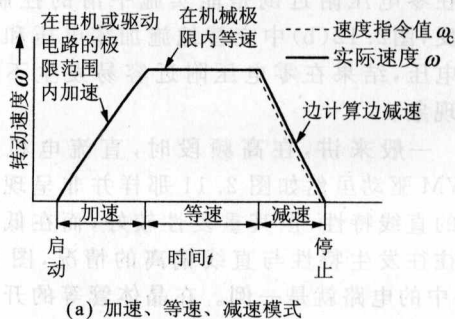


图 2.18 DC 电机或无刷电机在电流极限范围内加速,并按照与位置偏差平方根成比例的速度指令直线减速

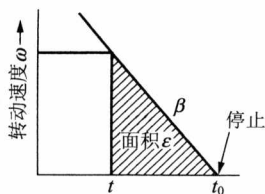
(b) 减速的速度 ω 、位置偏差 ε 、加速度 β 的关系

图 2.18 DC 电机或无刷电机在电流极限范围内加速,并按照与位置偏差平方根成比例的速度指令直线减速(续)

根据这些关系可以得到下式:

$$\omega = (2\beta\varepsilon)^{1/2} \quad (2.12)$$

2.1.3 交流(AC)伺服电机

交流(AC)电机有以下形式:

- ① 鼠笼式感应型电机;
- ② 交流整流子型电机;
- ③ 同步电机。

自动生产线的自动机械大多使用小型单相电源驱动的鼠笼式感应电机。几乎不使用交流整流子型电机。

机器人中采用永久磁铁转子的同步电机的伺服方式,以实现精确的速度控制和定位功能,这就是 AC 伺服电机。这个电机同时具备 DC 伺服电机的基本性质,又可以理解为把电刷和整流子换为半导体元件的装置,所以也叫做无刷 DC 伺服电机。图 2.19 表示它的一种内部结构。图 2.20 是驱动系统的电路原理图。图 2.21 则用图解来描绘它与 DC 电机的异同点。

转子的位置信息和施加在绕组上的电压或电流的关系是至关重要的。首先,为了向绕组配电,有两种检测转子位置的方法:一种是用霍尔元件等,把转动一圈分解为 3p;另一种是借助于编码器或旋转变压器进一步提高分辨率。前者给电机绕组施加方波电压或电流;后者跟传统的交流电机一样,供给近似于正弦波那样的电流。就 AC 伺服电机而言以后者的应用最普遍。AC 伺服电机的特征如下。

(1) AC 伺服电机的形式多样 无刷电机的形状变化很多,在现代机器人的设计中从这一点上得益很多。大体上划分一下,图 2.19 是内转子型结构,它又有细长型电机和扁平型电机(图 2.22)之分。此外,还有外转子型结构(图 2.23)。这种电机转动惯量大,由于增大了永久磁铁的体积,适用于小型高

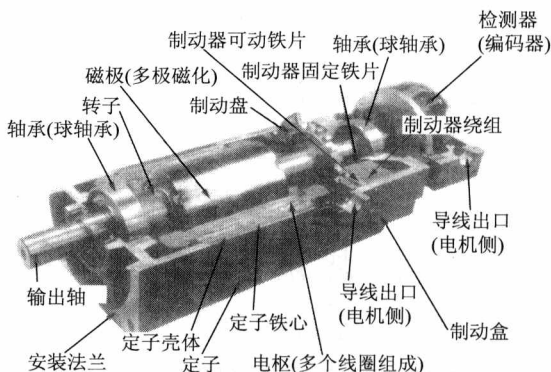


图 2.19 AC 伺服电机(无刷 DC 电机)的结构(山洋电气)

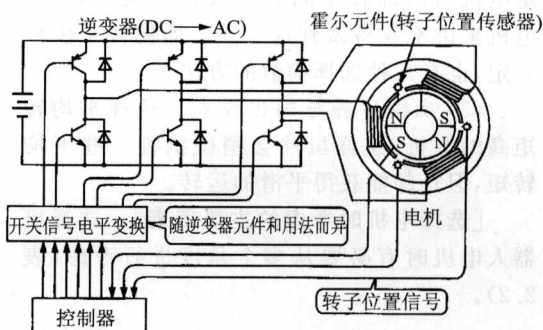


图 2.20 AC 伺服电机驱动系统的电路原理图

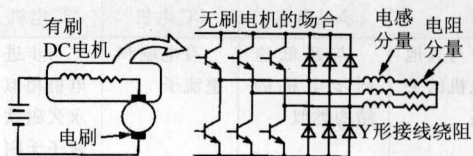


图 2.21 DC 电机与 AC 电机的共同原理

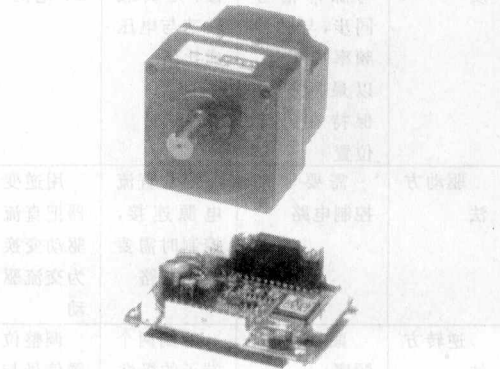


图 2.22 带齿轮箱的扁平型电机,右边是驱动电路(东方马达公司)

转矩电机。除了商品电机之外,有时电机还与机器人合起来进行一体化设计,此时外转子型比较适用。

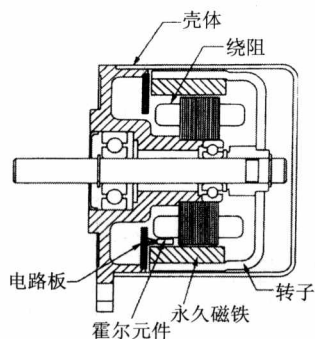


图 2.23 外转子型 AC 伺服电机的结构

(2) 槽数与磁极级数的选择 小型高转矩电机与增加转子的磁极数目有关。对 DC 电机来讲不容易做到这一点。即使转子极数一定,也有几种选择槽数的方法。

(3) 磁铁材料与磁化模式 选择平均转矩高的电机,这样虽然会稍微牺牲一些平均转矩,但是却能获得平滑的运转。

[选择电机时考虑的主要因素] 选择机器人电机时有必要从多个角度进行考虑(表 2.2)。

表 2.2 步进电机、DC 电机、AC 电机的比较

	步进电机	DC 电机	AC 电机
与其他电机的关系	与超低速同步电机的结构类似	有电刷和整流子	与步进电机相似 永久磁铁 转子无刷 类似于 DC 电机
基本性质	转动速度与脉冲信号同步,与脉冲频率成正比,以最后脉冲保持在一定位置	直线特性:无负载转速与电压成比例	
驱动方法	需要驱动控制电路	只与直流电源连接,控制时需要控制电路	用逆变器把直流驱动变换为交流驱动
逆转方法	颠倒励磁顺序	颠倒两个端子的极性	调整位置信号与逆变器元件开关的关系
位置控制	以脉冲列的最后脉冲决定	用位置传感器反馈控制	类似于 DC 电机

续表 2.2

	步进电机	DC 电机	AC 电机
速度控制	与脉冲频率成正比转动,故简单,但伴随转动会产生波动	反馈控制。平滑	类似于 DC 电机
转矩控制	复杂。即使电流一定,也有微小的位置变化	转矩与电流成正比	类似于 DC 电机
效率	比 DC 电机低,且越是小型效率越低	有效利用反电动势,效率高,尤其在高速区域差	类似于 DC 电机
端子数(导线数)	随电机形式的不同分为 二相双股:5 根线 五相五角形:5 根线	仅仅转动:2 根线 速度控制:(电子调速器)2 根线,(测速发电机)3~4 根线,(编码器)7~8 根线	随方式稍不同。 三相供电:3 根线。霍尔元件:5 根线

1. 可靠性与寿命

虽然 DC 伺服电机最为常用,但是电刷和整流子引起摩擦损耗,在长时间使用条件下可靠性将下降。步进电机或 AC 伺服电机具有良好的可靠性。

• 双轴与单轴 实际上,大多数用户都希望选用如图 2.24 所示的双轴电机,但是作为商品电机中双轴电机很少。设计专门双轴电机时的注意事项是,如果将它和齿轮箱集成在一起,输出轴的输出转矩很大,电机轴本身则只需低转矩和高转速。如果设计造成电机轴上的悬臂载荷很大,就会大大降低电机的性能。

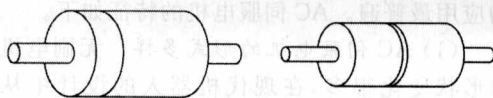


图 2.24 双轴电机(带有齿轮箱)

2. 与负载的整合(稳态特性和加速特性)

简单地讲,小型高效电机就是高速电机。但是,组成机器人的臂、手脚的动作速度都比

较低,这就需要利用减速机构,如齿轮、滑轮、带轮等与电机进行负载的整合。齿轮有直齿伞齿轮、行星齿轮、蜗轮蜗杆和谐波齿轮等。

选择齿轮有几个要点,首要的是转速比,然后是传动效率的问题。选择转速比时也要考虑若干因素,其中稳态特性和加速特性对它较大的影响。在这一点上DC电机和AC电机是相同的,但步进电机却有所不同。

1) 重视加速时

功率比(power rate)这个参数具有重要的意义。用图2.10来进行说明。设减速比为 ξ 、负载的转动惯量为 J_L 、电机的转动惯量为 J_M ,则如果有关系式

$$\xi \left(\frac{J_L}{J_M} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

成立,则认为减速比达到最优值。接着,假定电机产生的转矩为 T 、负载所期望的加速度为 α ,则功率比 P_R 定义为

$$P_R = \frac{T^2}{J_M} = 4\alpha^2 J_L \quad (2.14)$$

式(2.14)的中间是与电机有关的值,右边是与负载有关的值。也就是说,电机所要求的功率比由负载转动惯量和加速度的希望值决定。这时,不能简单地由“额定转矩”决定转矩值,而必须注意加减速的频繁性对电机输出转矩的要求。由式(2.1)可知,DC电机的转矩基本与电流 i 成比例。于是,设计驱动电路必须保证加速时所需要的电流。

2) 稳态时

根据式(2.5),应该将最大效率条件作为一个指标。

3. 导线的数目

进行机器人设计时希望使用较少的导线数量。就导线的数目来看,如果仅仅是转动的话,那么DC电机至少需要2根。相比之下其他电机需要如下的根数。

(1) 无刷电机 电力电路3根导线,位置信号5根导线,合计需要8根导线。随着驱动方法的不同,导线的数目还可能增加。

(2) 步进电机 随驱动方式的不同有4根、5根、10根导线等。

如果有速度控制环和位置控制环,那么导线的数目会变得复杂一些。

此时,DC电机需要安装编码器作为位置传感器,电源端子和信号线有5根导线,与电

机本身的导线加起来一共是7根。无刷电机共有15根导线。

4. 无励磁的特征

电机根据无电流时是否能够保持一定位置,分为两种。步进电机的停止转矩就是其中之一。有些驱动器带有制动器,其中分为无励磁时制动或相反(释放制动)。

应该引起注意的是,DC/AC伺服电机无励磁时很容易受外力作用而产生转动,但是短路时产生制动力。如果传动中有蜗轮蜗杆副,那么在无励磁状态下它们多半都能保持一定的位置。如果用直齿轮或行星齿轮传动,由于静摩擦转矩很大,所以在无励磁的条件下也能保持一定的位置。

5. 电机转动的平滑性与噪声

电磁电机中流过线圈的电流是必须交叠流动的,这就可能产生转矩波动,从而引起振动。在电机的磁路设计中,为了减少电力损失,大多采用齿-槽结构,这也是导致转动产生波动的原因之一。

简单地说,步进电机容易产生转矩波动、振动及噪声。不过,通过步进驱动的细分技术可以改善这一点,代价是成本的上升。

6. 温度界限

驱动器的使用温度界限是一个重要的问题。在电机参数中,两个重要的参数,即绕组的电阻和与永久磁铁的磁通有关的反电动势常数(等于转矩常数),它们都会受到温度的影响。

7. 瞬间力

步进电机不适合在需要瞬间内产生大转矩的场合应用。

8. 电机的运动形态

电机的运动形态有转动(rotary motors)和直线(linear motors)两种,其中的绝大多数是转动。其理由是直线型电机的结构尺寸大,而转动型电机的结构尺寸小,运动变换灵活。

见城尚志

2.1.4 直接驱动(DD)电机

在齿轮、皮带等减速机构组成的驱动系统中存在间隙、回差、摩擦等问题,克服这些

问题的手段可以借助于 DD(直接驱动, direct drive)电机。它被广泛地应用于装配 SCARA 机器人、自动装配机、加工机械、检测机器及印刷机械等中。

对 DD 电机的要求是没有减速器,但仍要提供大输出转矩(推力)。这就要求在电机原理和结构上进行改进,以便直接产生与减速器增倍效果相同的转矩(推力)。另外,可控性好也是一项重要指标,为此人们付出大量的努力。

1. 工作原理与特点

表 2.3 中给出了 DD 电机的工作原理和各种特性的比较。从特性上看,基于电磁铁原理的 VR(Variable Reluctance 可变磁阻)电机及基于永久磁铁的 HB(hybrid)电机,在相同质量的条件下能够提供大转矩。在低速时 DD 的问题不多。世界上第一台关节型 DD 机器人中使用的是 DC 电机^[8],其后又开发了 AC 电机,在商用机器中,大多使用 VR 或 HB 电机。

表 2.3 不同工作原理的特性比较

工作原理	转 矩	速 度	控制性
DC	小	中	良
AC	中	高	良
VR	大	低	平
HB	大	低	差

可是,VR 电机的磁路具有非线性,控制性能比较差;基于永久磁铁的 HB 电机存在转矩波动大的缺点。因此,市场上销售的电机都在尽力减轻这个波动。

2. 转动型 DD 电机

仅仅根据简单的动作原理制作的 VR 或 HB 电机是无法获得足够大的转矩的,大转矩输出的转动型 DD 电机需要采用独特的结构。

图 2.25 所示的 HB 型转动 DD 电机^[9]的结构与普通电机的不同,电机的内侧为定子,外侧是转动结构。由于不但磁路相向的面积增大,而且作用半径也加大,于是能产生强大的转矩。此外,由于从结构上稍微改变了定子与动子的齿距,还收到了减轻永久磁铁产生的转矩波动的效果。

图 2.26 给出了一个 VR 型转动 DD 电

机^[10]的结构。定子从两侧把转子夹在中间,这样的结构可以产生 2 倍的转矩效果。驱动电流与转矩的非线性关系则通过软件进行补偿。最近,结构又被改进成把永久磁铁夹在磁路的各个齿之间,使转矩得到进一步提升,这种电机正在实用化中。

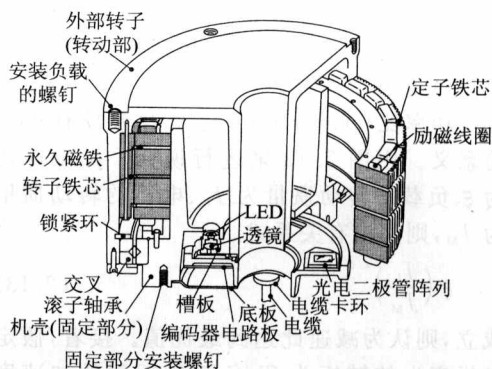


图 2.25 HB 型转动 DD 电机的结构

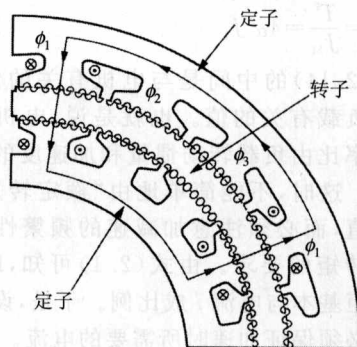


图 2.26 VR 型转动 DD 电机的结构

转动型 DD 电机能够在精确定位的自动机械中代替减速器加伺服电机的传动系统。以卡耐基-梅隆大学为首,世界上已经开发出多种关节型的 DD 机器人,不过目前除了用其进行高速搬运作业外,它尚未达到普及的程度。

3. DD 位置传感器

与一般的伺服电机相比,DD 电机需要高分辨率的位置传感器,转动型 DD 电机的分辨率大约需要数十万分之一转,相当于后述直线型 DD 电机数微米左右的分辨率。

高分辨率位置传感器的价格相当高,如果注重传感器的成本,就不得不牺牲一点绝对精度。图 2.25 的 DD 电机采用图 2.27 所示的光学编码器。该编码器的金属符号板上有 320 条光栅格,特制光传感器阵列能读取 1

个光栅格的 $1/2048$, 于是可以得到 65 万分之一的分辨率。绝对精度取决于金属符号板的加工精度, 是分辨率的 $1/10$ 左右, 这种精度对于普通用途来说基本上没有问题。

电机换流控制的信号也是从这个传感器上读取的, 图 2.26 所示中 DD 电机使用电磁旋转变压器充当传感器, 它与电机共用同一个铁心。

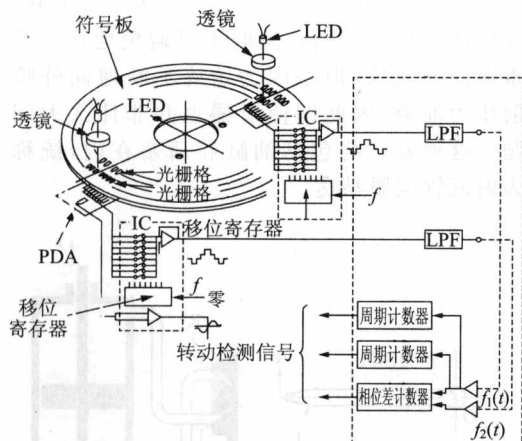


图 2.27 高分辨率光学式编码器

4. 直线型 DD 电机

图 2.28 所示的直线型 DD 电机是把转动型 DD 电机展开成直线的结构, 传感器为玻璃刻度尺。该电机的精度高, 重复性好, 速度快, 用它代替滚珠丝杠传动的机器人运动单元的事例日益增多。最近, 装备直线型 DD 电机的机床数量急速增加。这种机床的最大特点是速度快, 使生产效率得到大幅度提高。

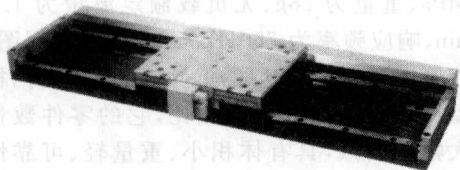


图 2.28 直线型 DD 电机(横河电机)

5. 平面型 DD 电机

多数情况下, 人们将两个直线型 DD 电机以直角形式组合起来作为 X-Y 平台使用。不过从传统上看, 一直就有所谓的平面步进电机在 X-Y 绘图机、晶片检测器等中应用。它们悬浮在空气轴承上进行运动, 从原理上讲是无摩擦的, 但因为控制是开环的, 分辨率的

极限只在 $10\mu\text{m}$ 左右。

为了克服这个缺点, 图 2.29 用三轴(X、Y、 θ)位置传感器组成全闭环控制的超高精度平面 DD 电机^[11]。三轴位置传感器使用波长稳定的小型化半导体激光器, 将其安装在动子上, 分辨率达到 $0.027\mu\text{m}$, 同时还能高精度测定动子的转动角(θ)。这样不但能精确定位, 而且有利于克服伴随移动过程而产生的转动。

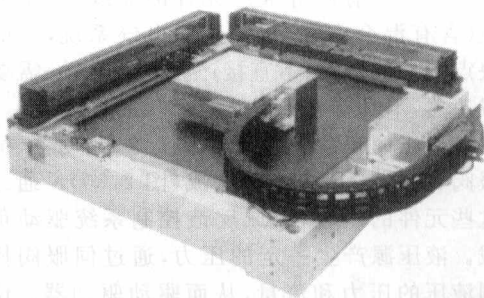


图 2.29 超高精度平面型 DD 电机(横河电机)

该超高精度平面 DD 电机能在 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的平面内达到 $0.1\mu\text{m}$ 分辨率和 $1\mu\text{m}$ 精度, 性能非常好。由于它的摩擦力非常小, 可以在 15ms 的调整时间内达到 $\pm 1\mu\text{m}$ 的定位精度, 因此其在高精度的检测装置中得到应用。

桑原 一

2.2 液压驱动器

液压传动的特点是转矩与惯性比大, 也就是单位重量的输出功率高。如果既要求在重负载下具有高速和快速响应, 又要求体积小、重量轻, 那么只有液压才能满足。液压传动还具有不需要其他动力就能连续维持力的特点。液压在机器人中的应用, 以面向移动机器人, 尤其是重载机器人为主。它用小型驱动器即可产生大的转矩(力)。在移动机器人中, 使用液压传动的主要缺点是需要准备液压源, 其他则与电气驱动无大的区别。如果选择液压缸作为直动驱动器, 那么实现直线驱动就十分简单。

在机器人领域, 液压驱动器曾经广泛被应用于固定型工业机器人中, 但是出于维护等角度的考虑, 它已经逐渐被电气驱动所代替, 不过目前在移动式带电布线作业机器人、水下作业机器人、娱乐机器人中仍有应用。

为便于理解液压驱动器构成的液压伺服

系统的特点和应用范围,可以设法将电气伺服与电液伺服进行简单的比较。首先,液压系统具有高刚性、力保持性可靠、小型轻质、转矩惯性比大等优点,而电气系统则具有维护简单、控制手段先进、速度反馈容易等优点。

从缺点上看,液压系统易漏油,故必须配置液压源(车载时,与电驱动一样需要发电机),另外还有阀等液压元件的非线性、压缩性(含有混合空气)等。至于电气系统,它的缺点则是重量大、不直接产生直线运动、需要减速器,不具有力保持性等。

液压伺服系统主要由液压源、驱动器、伺服阀、传感器、控制器等构成(图 2.30)。通过这些元件的组合,组成反馈控制系统驱动负载。液压源产生一定的压力,通过伺服阀控制液压的压力和流量,从而驱动驱动器。位置指令与位置传感器的差被放大后得到的电气信号输入伺服阀中驱动液压执行器,直到偏差变为 0 为止。若传感器信号与位置指令相同,负荷停止运动。

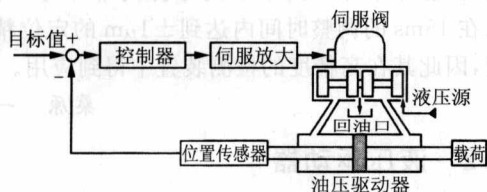


图 2.30 电液伺服系统

伺服阀是液压系统中不可缺少的元件,它的作用主要是把电气信号变换为液压驱动力。它经常被用于需要响应速度快、负载大的应用场合。有时人们也选用较为廉价的电磁比例阀,但它的控制性稍差。

2.2.1 伺服阀的结构和特性

伺服阀按原理方式进行分类有射流管式、喷嘴挡板阀式、滑阀式等。另外,按大功率输出(高压、大流量)进行分类,伺服阀有基于喷嘴挡板阀的溢流阀的二级型、三级型、直动型(由动圈式直接驱动溢流阀)等。一般来说,电气信号是通过伺服放大器向力矩马达施加输入电流的。

1. 射流管伺服阀

阀的组成原理如图 2.31 左侧所示,导入

射流管中的压力油液从射流管头部的圆孔喷射出来。喷嘴管头部前方并列着两个进流孔,各自与不同的液压缸连接。如果射流管头部位于两个进流孔的中间位置,油束向两个进流孔对等地进行喷射,液压缸活塞不动作。如果它稍微偏离中央位置,原来向两孔喷射的平衡状态就被打破,而产生压力差,使活塞向一侧开始动作。这样,用微小的力移动射流管,就可以驱动固定在活塞上的负载。在射流管位于平衡位置时不可避免地存在严重漏油的现象,但是因为始终不断地向外喷射压力油液,因此即使泄漏也并非什么大问题。这种方式将包括油缸和活塞在内,统称为射流管伺服马达。

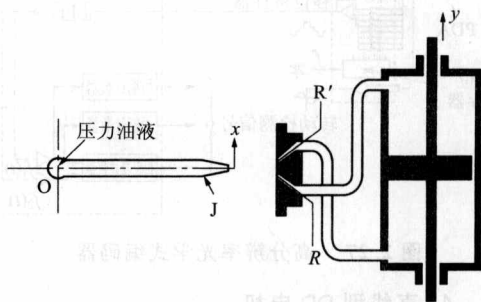


图 2.31 射流管伺服阀

典型的射流管伺服阀的例子可以举出美国犹他大学和 Sarcos 公司的产品,它们被广泛用于机器人的驱动。它的设计思想就是避开通用伺服阀的研发,直接以机器人和机械手的驱动为对象。图 2.32 是射流管悬置式 Sarcos 伺服阀 A3000H/50(最大进油压力 21MPa、重量为 28g、无负载额定流量为 1.9 l/min、响应频率为 750Hz, -3dB)的剖面图。射流管通过力矩马达驱动。与传统喷嘴挡板式溢流阀驱动的伺服阀相比,它的零件数量被大幅度削减,具有体积小、重量轻、可靠性高、易维护的特点。这种阀多用于游艺场所中的娱乐类人机器人或主从机械手。这种阀甚至还可以使用水压或气压。

2. 喷嘴挡板伺服阀

如图 2.33 的上部所示,从喷嘴头部出来的射流喷射到挡板上,在喷嘴的管路上有一个固定的节流孔。挡板和喷嘴之间的间隙起到环状可调节流孔的作用,力矩马达使挡板的位置发生改变,于是喷嘴的背压就被改

变。挡板位移与喷嘴背压之间的关系是非线性的,但在某一个范围内,背压与挡板位移成比例。把该背压导入到图 2.33 下方的活塞缸中就能驱动负载。喷嘴挡板伺服阀有很好的可操作性,但其比射流管伺服阀的功率水平低一些。同时,它与射流管伺服阀一样也存在不可避免的内部漏油问题。除此之外它还需要过滤器,因为它抗灰尘等污染的能力较差。

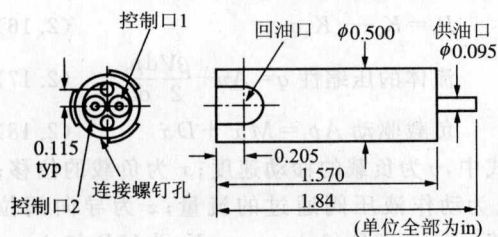
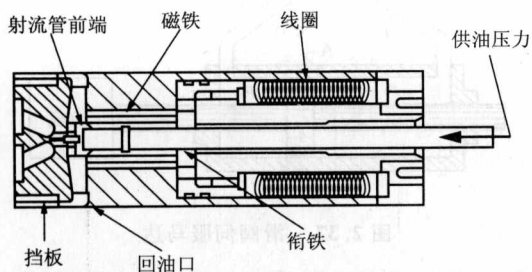


图 2.32 射流管伺服阀 A3000H/50

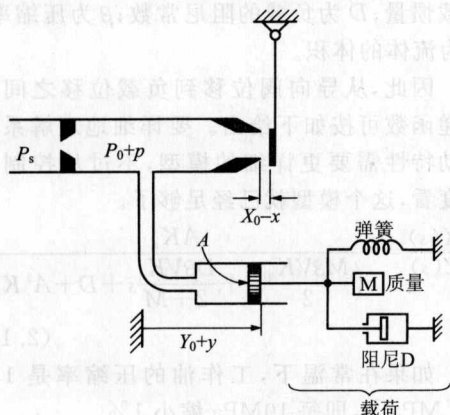


图 2.33 喷嘴挡板伺服阀

3. 喷嘴挡板滑阀驱动二级伺服阀

目前,市场上出售的伺服阀中多数都是这种喷嘴挡板滑阀驱动二级伺服阀。图 2.34 是这种类型的伺服阀的典型结构,由东京精密测器制造的 401F。上面的一级是由输入电

流驱动的力矩马达。该力矩马达使挡板产生左右微小位移。这样,与之相对设置的喷嘴的可变节流间隙就会发生变化而改变背压。把这个背压导入阀心的两侧,阀心受到与压差成比例的力而被驱动。在阀心中有弹簧与挡板连接,它产生与阀心位移相反的力矩作为力反馈,在力矩的平衡位置停止,阀心保持定位。在阀套与阀心之间得到了与阀心位移成比例的节流开度,无负载时,液流的流量几乎与输入信号成比例。滑阀静特性的数学模型可由下式^[1]给出:

$$q = cBx \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \sqrt{P_s - (\text{sgn } x) p_1} \\ = k_0 x \sqrt{\frac{1}{2} (P_s - (\text{sgn } x) p_1)} \quad (2.15)$$

式中, c 为流量系数; B 为口宽; x 为工作流体的相对重量; g 为重力加速度; P_s 为供给压力; P_1 为负载压力; q 为流量; sgn 为符号函数。

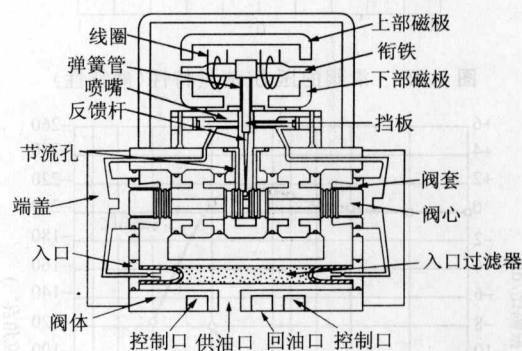


图 2.34 喷嘴挡板滑阀驱动二级型伺服阀的结构

图 2.35 表示滑阀的压力-流量特性(静特性)。阀心位于中立点状态时,特性随阀心和阀套的轴向的间隙的重合量的大小发生变化。在中立点状态时,滑阀的内部泄露最少,称为正重叠,此时由于死区加大,控制特性不好。当滑阀始终存在内部泄露状态时称为负重叠,此时控制特性优良。在负重叠状态下,中立点附近阀心的位移 z 参数化成压力 P_1 后,与流量 q 的特性可以近似为下列线性公式:

$$P_1 = K_z z - K_q q \quad (2.16)$$

伺服阀的动态特性由制造厂家测试后以频率响应特性的形式公开。图 2.36 就是这个频率响应特性的一个例子。主要按增益为

-3dB 所对应的频率表示。在市场上出售的伺服阀中, -3dB 所对应的频率一般大于 100Hz, 高的可以达到 1kHz。

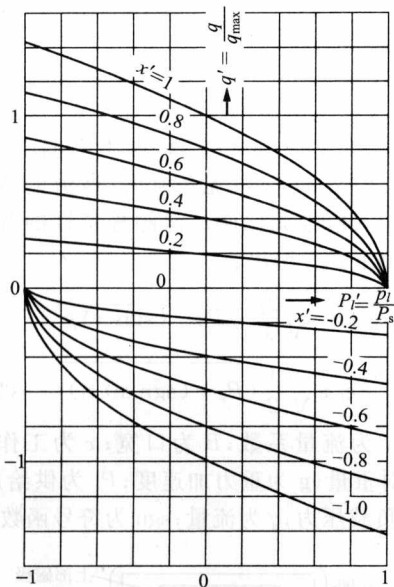


图 2.35 滑阀的压力-流量特性(静特性)

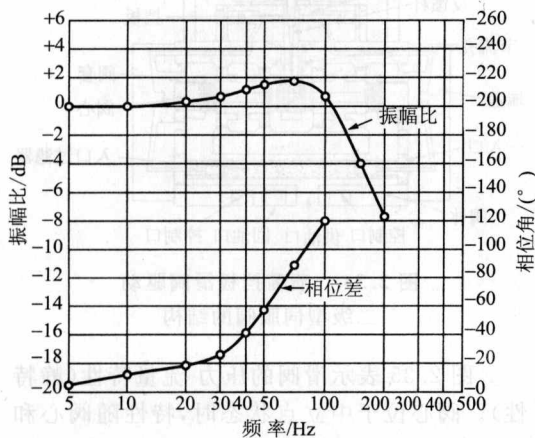


图 2.36 伺服阀的频率响应特性

2.2.2 液压伺服马达及其动态特性

把液压控制阀与液压驱动器组合起来就称为液压伺服马达。

要进行机器人各轴系统动态特性的讨论就要建立数学模型。在推导前需要先做如下假设条件, 如管路较短, 未混入空气, 机器人手臂可视为刚体, 放大器和伺服阀的动特性均足够快, 可以忽略等。

[考虑压缩性的三维模型] 如图 2.37

所示, 讨论液压伺服马达。滑阀与液压驱动器(液压活塞缸、液压马达、摆动缸)组合而成的系统叫做滑阀伺服马达。

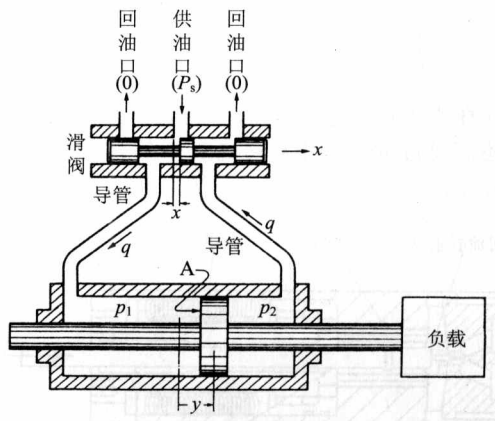


图 2.37 滑阀伺服马达

首先, 在阀心和阀套负重叠的条件下, 将滑阀压力-流量特性线性化, 即

$$P_1 = K_z z - K_q q \quad (2.16)$$

$$\text{流体的压缩性 } q = Av + \frac{\beta V dp_1}{2 dt} \quad (2.17)$$

$$\text{负载驱动 } Ap_1 = M\ddot{x} + D\dot{x} \quad (2.18)$$

式中, v 为负载的移动速度; x 为负载的位移; q 为动作液压阀通过的流量; z 为导向阀位移; K_z 为 $(\partial P_1 / \partial z) z = z_0$; K_q 为 $(\partial P_1 / \partial q) q = q_0$; p_1 为负载压力; A 为活塞有效面积; M 为负载惯量; D 为负载的阻尼常数; β 为压缩率; V 为流体的体积。

因此, 从导向阀位移到负载位移之间的传递函数可按如下给出。要详细地理解系统的动特性需要更详细的模型, 不过从控制的角度看, 这个模型就已经足够了。

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{AK_z}{s \left(\frac{M\beta VK_q}{2} s^2 + \frac{D\beta VK_q}{2+M} s + D + A^2 K_q \right)} \quad (2.19)$$

如果在常温下, 工作油的压缩率是 $1 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$, 即每 10MPa 缩小 1%。

同样, 这里虽然没有用数学模型将其表示出来, 但前面的图 2.31 也可以称为射流管伺服马达, 图 2.33 也可以称为喷嘴挡板伺服马达。

2.2.3 电液伺服马达

在实际应用的场合, 将 2.2.2 节中所讨

论的液压伺服马达用作伺服阀,就构成如图2.30所示的液压系统,它的输入是电气信号(电压或电流)。这样做便于在控制器中使用计算机,以实现比较先进的控制。如果进一步再对液压源实施控制,就能组成一个在高速、高负载下的节能系统。最近的研究指出,利用现代控制技术可以构成性能更好的电气液压控制系统^[3]。目前,从液压源到驱动器的成套商品已经开始出售,液压伺服的使用越来越便利了。

横田真一

2.3 气动驱动器

2.3.1 气动技术概述

1. 气压的利用

气压能极方便地用于驱动技术,在生产系统自动化、省力化等方面广泛地发挥着作用。它的应用形态大致有下列几个方面。

① 空流(风力)的利用。帆船、风力发电、空气搬运、谷物筛选等。

② 真空的利用。真空吸盘、壁面移动机器人等。

③ 气压的利用。

- 悬浮。空气轴承、滑翔机、充气球场等。
- 信号处理。纯射流元件、调节器、逻辑元件等。

④ 动力源。搬运、位置控制、力控制等。

真空吸盘大多被用来充当机器人的手。在机器人的周围有很多以气动作为驱动源的装置,为此,机器人本身也可以采取气压驱动。在这些装置中,需要有一种将空气的压力变换为机械能的机器,狭义地讲,它们就是④中所列出的气压驱动器。

2. 气压驱动器的特点

气压传动有以下优点:

- ① 能量储蓄简单易行,可以获得短时间的高速动作。
- ② 可以进行细微的力控制。
- ③ 夹紧时无能量消耗,不发热。
- ④ 柔软,安全性高。
- ⑤ 体积小、重量轻,输出/质量比高。
- ⑥ 处理简便,低成本。

①~④的优点是由空气的可压缩性决定的,是气压固有的特征。

反之,由于压缩性带来的柔软性又降低了驱动系统的刚度,因此它具有以下缺点:

⑦不易实现高精度、快速响应的位置和速度控制,控制性能易受摩擦和载荷的影响。

在使用时我们应该充分利用优点①~④,尽量避开弱点⑦,或者尽量减少这个弱点的影响。

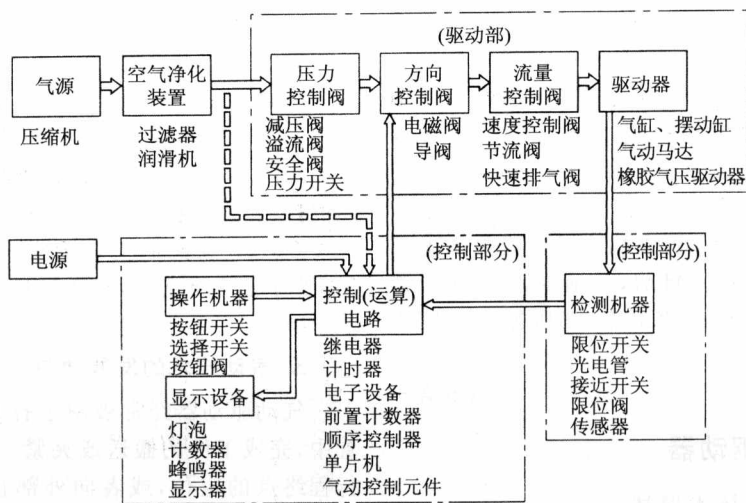
3. 气动技术的发展动向

气动驱动器经常被用于省力和自动化装置中,完成工件的搬运或夹紧。这时,驱动器行程终点的定位,或者向外部止动块某个点的运动定位控制是受到关注的主要任务。十几年前,人们就开发了不少带制动器的气缸多点定位系统,将其用于点焊机器人等。随着计算机的普及,气压伺服的研究也变得越来越活跃,各种各样的控制理论被用于气动伺服系统。气压驱动器已经应用到机器人手的夹持器和简易机器人的驱动中。随着气压伺服性能的提高,提高这些应用的控制性能已经成为可能,人们期待着在机器人或机电领域中,气压伺服的应用越来越普及。

近年来,人们在研究与人类亲近的机器人和机械系统时,气压驱动的柔软性受到格外的关注。目前,面向康复、护理、助力工具等与人类共存、协作型的机器人已崭露头角,与之有关的软驱动器的研究也在大力发展中。

2.3.2 气动系统的基本组成

气动系统的组成如图2.38所示^[1],当气动系统进行设计时,首先面临如何将驱动器与控制阀组合的问题。在系统中,气缸与控制阀有多种组合方式,选择时应该从作业内容、使用环境、能量效率等几个方面考虑决定组合形式。为此,可以援引制造厂家开发的计算机设计程序。然后,附加检测机构和控制装置,控制装置既可以用顺序控制器,也可以用单片机。至于控制的方式,根据用途的不同既可以选基于开关动作的顺序控制,也可以选连续动作为目的的反馈控制。

图 2.38 气动系统的组成^[1]

2.3.3 气压驱动器的分类

气压驱动器可以粗略地分为气缸、气动马达、摆动缸等，还有橡胶气压驱动器等^[2]。

1. 气缸

气缸是气动技术中一种典型的设备，调节压缩空气的给、排气即可实现往复直线运动。

单作用型气缸就是仅给气缸的一端提供压缩空气，返回行程则依靠气缸内部的弹簧伸长。双作用型气缸就是给气缸的两端提供压缩空气，通过气压实现往复行程动作。双作用型气缸比单作用型气缸的工作行程长。图 2.39 给出一般的气缸的结构^[1]，它属于单活塞杆双作用型，气缸的两端均有缓冲装置。另外，受压部分也可以采用波纹管或膜片结构，如图 2.40 所示。这种结构的行程受到限制，但可用于低摩擦、低压、高精度驱动器。

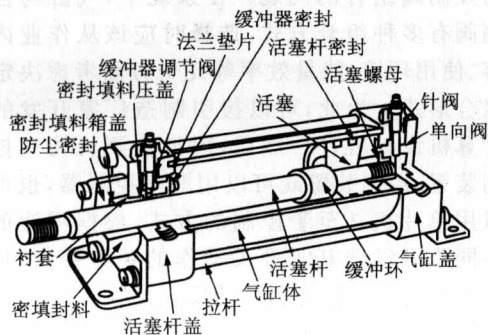
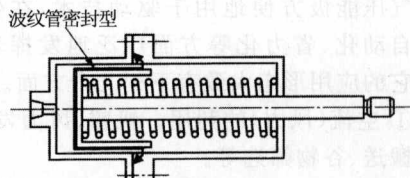
图 2.39 气缸的基本结构^[1]

图 2.40 波纹管密封型气缸

随着气缸功能的复合化，将控制阀、位置传感器、导向机构、制动机构集成的气缸已经相当普及了^[2]。图 2.41 是一个带制动器的气缸，它利用气压动作的机械制动器有力地将其活塞杆固定。目前，正在开发将液压或电磁制动器用于气缸制动中。带制动器的气缸在计算机控制下能组成多点定位系统，为了提高定位精度，有人引入了利用定位误差的、补偿制动器动作位置的学习控制方法。

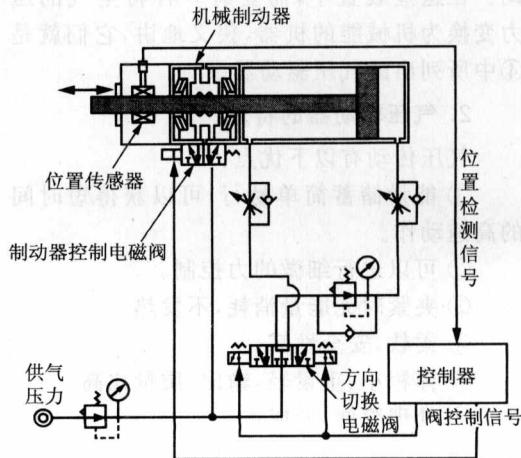


图 2.41 带制动器的气缸定位系统

除此之外,人们也正在开发小型气缸或薄型气缸及无(活塞)杆气缸。前者主要用于小型夹具或装配机器人的手部等,无杆气缸有利于节省空间,而且它不存在活塞杆被压曲的问题,可以符合大行程的要求,一般标准的行程为2m左右,最大可以达到5m。图2.42是无杆气缸的应用实例,可以简单地组成一个三轴直角坐标机器人。图2.43的无杆气缸甚至能沿曲线轨道进行移动,构成一个立体搬运系统。

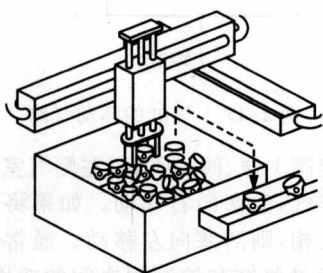


图 2.42 无杆气缸构成直角坐标机器人

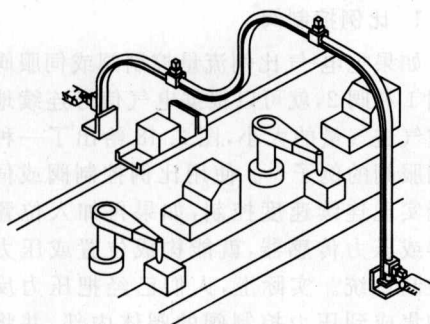


图 2.43 无杆气缸构成立体搬运系统

使用金属密封已经开发出速度低于1mm/s的稳定低速运动低摩擦气缸和静压气体轴承气缸,它们的位置精度能达到亚微米级,摩擦阻力小于毫牛[顿]。这些气缸可以实现对微小位移及微小力的控制,这些都是传统气缸无法比拟的优良性能。这些精密气缸开辟了新一代气动技术更广阔的应用天地,半导体制造业也是其中的一个方向。

2. 转动型驱动器

气动马达与摆动缸能实现旋转运动。

气动马达运动部分的惯性小,适合频繁间歇运动,即使过载也不至于出现烧灼等现象,可见它具有电动机不具备的特点。气动马达可粗略分为齿轮型、叶片型及活塞型,常

用的是叶片型和活塞型。气动马达利用气体的压缩能,比较容易得到低转速和高转矩。例如,牙科医疗器械、涡轮增压器中使用的涡轮型马达就是利用空气的高速动能,适合10 000r/min以上的高速转动。

摆动缸在限定的角度范围内做摆动。与气缸相同的是一般在行程的终点都要设置止挡块,如果向摆动缸引入反馈控制,它也能作为伺服驱动器使用。另外一种齿轮-齿条型摆动缸是将叶片或活塞的往复直线运动变换为旋转运动后使用的。

图2.44给出叶片型摆动缸的结构。增加叶片的数目,将减少摆动角度的极限,但是会增加输出的转矩。摆动角度的极限值在单叶片型中约为 280° ,在双叶片型中约为 100° 。叶片型摆动缸的质量轻、体积小,人们经常把它直接装入关节,组成体积紧凑的机器人手臂或手部。摆动缸没有减速器,属于直接驱动,可以实现被动柔顺控制^[3]。

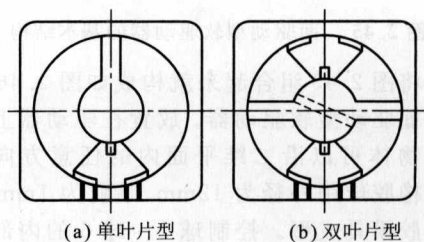


图 2.44 叶片型摆动缸的基本结构

3. 软驱动器

在空气的可压缩性引起的柔软性之上,如果驱动器本身也具有柔性,那么称这种驱动器为软驱动器。在探求与人类亲和的软机构而努力中,人们正在把注意力投向软驱动器。对于软机构特性的要求就是当位置、速度、加速度发生变化时,不会产生过大的反力,这相当于机构动作部分的机械阻抗非常小,也就意味着其质量轻、黏滞性低、刚性小。

能满足这种要求的驱动器,以橡胶人工肌肉驱动器为主,将各种橡胶作为材料的空气软驱动器的研究正在进行中^[4]。它们的基本原理一般都是利用橡胶囊或橡胶管内压的膨胀和橡胶弹性的收缩,通过调整橡胶本身的厚度和强化纤维来实现希望的动作。由于驱动器本身是柔软的,所以当欲接触的对象物体容易受到伤害时,它们就大有用武之地。

图 2.45 给出一个满足上述目的的面驱动型软驱动器的基本结构和动作原理^[5]。基本结构是在四个半球状橡胶球上搭载着一个橡胶球,球与上部的搬运物体接触,球的下部决定搬运方向和搬运速度。在图 2.45 的左图中,假定球 2 和 4 的压力平衡,升高球 1 的内部压力,降低球 3 的内部压力,上方的球 5、球 6 就被推着沿着球 3 的方向移动。图 2.45 的右图与左图的情况相反,改变球 1 和球 3 的内部压力,球 5、球 6 就被推向球 1。使球 1、球 2、球 3、球 4 同步运动,使球 5、球 6 收缩和膨胀,于是搭载在球 5、球 6 上的物体在摩擦力的作用下产生搬运力。

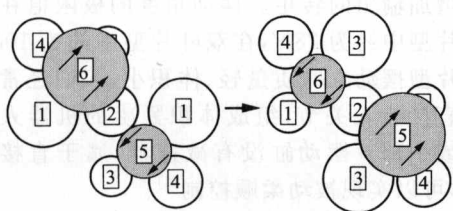


图 2.45 面驱动型软驱动器的基本结构

将图 2.45 组合起来就构成如图 2.46 所示的面驱动型软驱动器。放置在驱动器上的对象物体可以沿二维平面内的任意方向搬运。橡胶球用外径为 12mm、厚度为 1mm 的硅橡胶模具成型。控制球 1~球 6 的内部压力,可以得到 2mm/s 左右的搬运速度。把这个驱动器做的小一些,可以充当搬运微小物体或组成柔软移动机构。反之,如果将它做的大一些,则可以做护理床等。

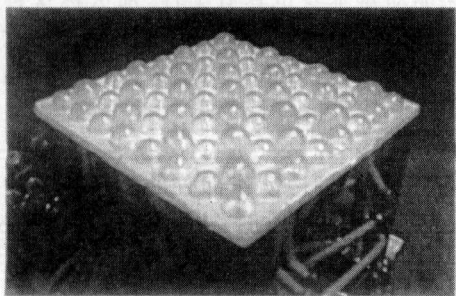


图 2.46 面驱动型软驱动器样品(冈山大学)

2.3.4 气动系统的组成

图 2.47 给出气缸驱动的基本气路图,作为控制阀,有方向控制阀(对气体流动、停止、流向进行切换)、流量控制阀(改变流量)、压

力控制阀(调整压力)等。端口数或切换位置的数量不同还可以将多个阀进行组合使用。在图 2.47 中,为了便于理解采用的是两个二位三通阀。

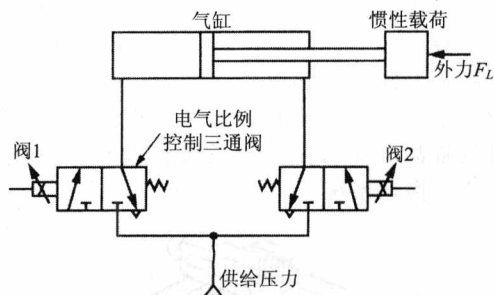


图 2.47 气缸的驱动气路

假定阀 1 通、阀 2 闭,向左侧气室供气,右侧气室排气,活塞向右移动。如果将阀的通、闭顺序反相,则活塞向左移动。通常,移动速度可以通过气缸和控制阀之间的速度控制阀的节流口进行调整。

1. 比例控制阀

如果把电-气比例流量控制阀或伺服阀用于阀 1 和阀 2,就可以根据电气信号连续地调整空气进气量的大小,图 2.48 给出了一种气压伺服阀的例子^[6]。使用比例控制阀或伺服阀能实现连续速度控制,如果再加入位置传感器或压力传感器,就能构成位置或压力反馈控制系统。实际上,人们已经把压力反馈机构集成到压力控制阀的阀体内部,并将它用于张力或推力控制中。

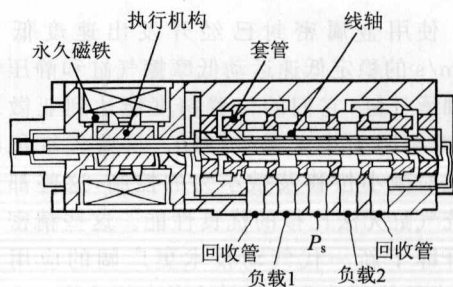


图 2.48 气压伺服阀的结构^[6]

2. 数字控制阀

通过脉冲调制驱动电磁开关阀,可以得到与比例控制阀相同的性能,这就是采用脉宽调制(PWM)方式或脉码调制(PCM)方式的数字控制阀^[7]。

PWM方式是指按一定载波周期 T_c 驱动,使电磁开关阀对应控制信号改变脉冲宽度 T_1 的控制方式。图2.49(a)中,阀的平均开口面积 S 与驱动信号占空比 $D(=T_1/T_c)$ 成比例。

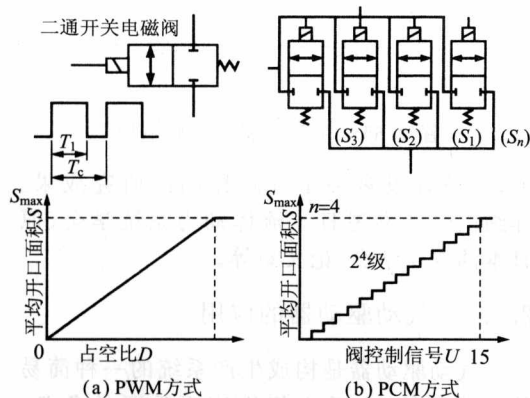


图 2.49 脉冲调制的数字控制阀

PCM方式是指把控制信号符号化为nbit的二进制信号 U ,然后驱动并联组合成的 n 个开关电磁阀。

在图2.49(b)中,如果让彼此连接的各个阀中阀的有效面积形成这样的节流效果: $S_0 : S_1 : S_2 : \dots : S_n = 2^0 : 2^1 : 2^2 : \dots : 2^n$ 的节流口,那么根据 U 就能够按照 2^n 的级别设定它们总的开口面积 S 。

图2.49中的每一个阀都执行一个二通流量控制阀的工作。如果将它们改为三通开闭电磁阀,就能够得到与三通比例控制阀相同的功能。这些阀的控制信号是数字量,于是可通过数字控制器的输出进行直接控制。

2.3.5 气压驱动器的控制

克服气压特征⑦的弱点的手段之一是气压驱动器与外部止动块或内置制动器组合使用。实际上,人们也在研究在比例控制阀或数字控制阀组成的气压伺服系统中,如何运用控制理论来克服这个弱点。研究的目的在于实现任意位置的定位或连续的位置控制、速度控制、力控制等,这些都是机器人驱动器应该具备的功能。

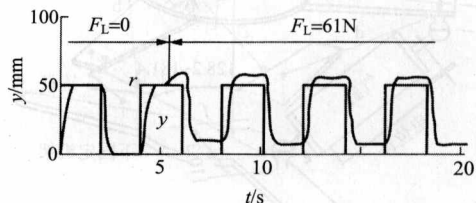
随着单片机的普及,人们已经开始运用各种控制理论研究气缸或气动马达反馈控制的方法。从基本的PID控制开始,直到最优控制、适应控制、模糊控制、神经网络控制、

H_∞ 控制等,人们针对它们的有效性进行了研讨。目前,对于气缸而言,一般可以达到500mm左右的行程,在1s左右实现 ± 0.1 mm的定位精度的水平^[8,9]。

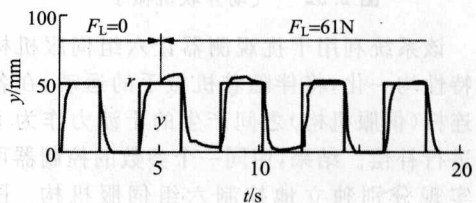
气压驱动器控制需要考虑由控制阀等流体阻尼非线性特性所引起的参数变化或工作部分的摩擦力变化。对这些参数变化最有效的控制手段就是适应控制和鲁棒控制。

1. 适应控制

人们一直致力于研究把模型规范型适应控制和适应极配置控制的理论应用于气压驱动系统。在采用电气比例控制阀的气缸位置控制系统中,考虑干扰因素后的适应极配置控制理论的控制结果如图2.50所示^[10]。这个控制系统的特点是在原来的适应极配置控制功能的基础上,又增加了将摩擦力、负载外力等干扰与控制对象的参数一同估计,并施加消除干扰影响的控制。在实验中,重复定位行程为50mm,约5s附近,在活塞前进方向上施加大约61N的外力。图2.50(a)是未补偿的干扰控制,产生较大的定位误差,图2.50(b)为有补偿的干扰控制,随着往复循环次数的增加,误差减少,表示出显著的干扰补偿效果。



(a) 无补偿干扰的控制系统



(b) 有补偿干扰的控制系统

图 2.50 有补偿干扰的适应控制的效果

2. 鲁棒控制

同样,抑制参数变化和干扰影响的鲁棒控制也能应用到气动系统中,图2.51给出了带干扰观测器(鲁棒控制方法之一)的控制系

统的基本组成。其原理就是把摩擦力和负载外力引起的参数变化作为干扰进行估计,并施加了消除这个影响的控制输入。由此可以降低非线性和摩擦力等的影响。图 2.51 中对滤波器 Q 的设计需要有一些技巧,但控制系统相当简单,对要求简单的气压系统来说是一种十分有用的控制方法。

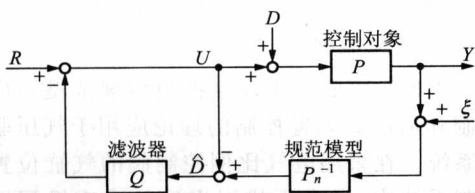


图 2.51 带干扰观测器的控制系统

采用干扰观测器的控制方法也被用于气动并联机械手中,如图 2.52 所示^[11]。这个并联机械手由六组气动伺服机构并联而成,每一组都配置有波纹管密封型气缸、PWM 数字控制阀。PWM 的载波部分对摩擦力有高频脉动效果。另外,在气缸的压力控制部分、速度控制部分之上还设置了干扰观测器。

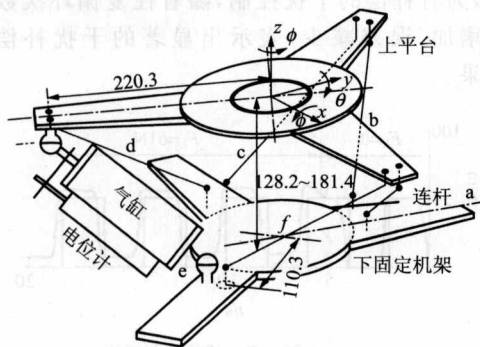


图 2.52 气动并联机械手

该系统利用干扰观测器让六组伺服机构的特性均一化,将伴随着机械手的运动,在各个连杆(伺服机构)之间产生的干涉力作为干扰进行补偿。结果,用同一个参数的控制器可以实现分别独立地控制六组伺服机构。图 2.53 表示在各个轴向上的阶跃响应。可以看出,它们都与设计控制器时给定的模型的响应非常一致,可见干扰观测器控制方法的有效性。

过去,人们往往认为用气动驱动器实现连续动作的伺服系统不会那么简单,但是通过引入适应控制或干扰观测器的控制方法,能够实现气压驱动器的高性能和多用途。目

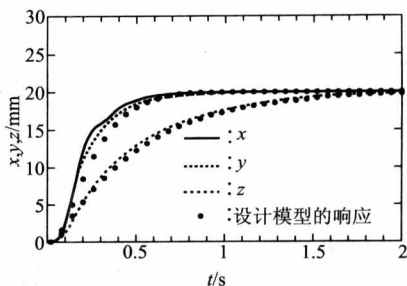


图 2.53 并联机械手阶跃响应

前,已经有很多关于气缸控制的研究成果。详细内容请参考日本流体动力系统学会(原日本油空压学会)论文集等。

2.3.6 气动驱动器的应用

气动驱动器是构成生产系统的一种简易的驱动元件,今后它将扮演更重要的角色。在一些场合不但要求定位,而且要求对作用力实施控制,或者在半导体装置等的特殊应用场合,气动伺服的应用将得到进一步发展。气压驱动的应用途径很广泛^[12],特别是在引入伺服技术后系统的性能变得更好,功能更强,其应用范围会越来越广。

例如,文献[13]中介绍了气动伺服在挤牛奶机器人上的应用。此外,在建筑机械的远程操纵装置、振子型电车的倾斜装置、触摸型人机界面装置中气动伺服都有应用。气动伺服原理还用于抑制汽车、电车振动的主动悬挂系统。从娱乐目的出发,由气动伺服驱动的恐龙、人体模型等也在开发之中。这些例子说明,人们对气压驱动应用于人类和生物有关研究的兴趣正在加深。在与人类和生物直接接触的作业中,人们对气动与生俱来的柔软性和安全性抱有期待。

如何构建柔软机构,积极地发挥气压柔软性的特点是今后气压驱动器应用的一个重要方向。例如,人们期待气压驱动器在生产现场作业中发挥辅助作用,在医疗、康复领域或家庭中扮演护理或生活支援的角色等,所有这些在研究上都是围绕与人类协同作业的柔软机器人的关键技术展开的。

可以相信,气缸等传统驱动器与各种新型柔软驱动器彼此融合,将会开拓出更多的应用领域。

则次俊郎

2.4 特殊驱动器

2.4.1 压电元件

利用压电及电致伸缩现象的压电元件,除了在应变仪、加速度计、超声波传感器上应用以外,还能作为小型压电驱动器使用,它的优点是电-机械变换效率高,从尺寸上比较输出的力相对较大。

1. 压电和电致伸缩元件特性

若给水晶、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等压电体(尺寸 l)施加力就产生尺寸变化 Δl ,对应于应变 $\Delta l/l$,在压电体的两个表面将产生正、负极化电荷。反之,如果给它们施加电场 E ,就会产生机械应变,取比例系数为 d ,则有关系式 $\Delta l/l = d \cdot E$ 成立。

如果将电场施加到 $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$ (称为PZT)等强电介陶瓷中,电场和应变之间就呈现如图2.54所示的蝶形曲线关系(图2.54中的序号表示轨迹的顺序)。

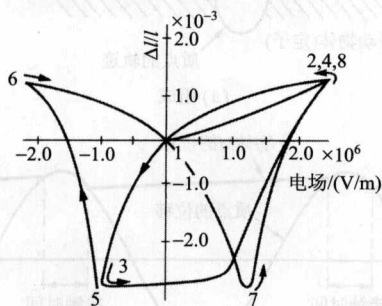


图 2.54 强电介陶瓷的应变-电场特性

该曲线是由初期状态的压电陶瓷在随机的方向上自发极化的各个区域构成的,这些区域在外部电场的作用下向一个方向极化。因此,如果对压电陶瓷施加强电场进行定向的预极化处理,然后再施加交变电场,那么在图2.54中斜率最大的曲线的圆点附近,产生对应电场大小的交变应变,随后就可以与压电体进行同样的处理了。我们把此时的比例常数定义为 $\partial(\Delta l/l)/\partial E$,将该值与弹性系数的乘积叫做压电应力常数 e 。必须进行极化处理的压电材料在居里温度以上时,结构发生变化(相转移),失去压电性,这一特性是选用材料的重要依据。

有些材料产生与电场的二次幂成比例的

应变,即 $\Delta l/l = ME^2$ (M 为电致伸缩系数),这叫做电致伸缩效应。特别地,将能显示出强电致伸缩效应的材料叫做电致伸缩材料,在压电陶瓷中,开发出电致拉伸材料PMN,它能产生与压电材料相同程度的应变。用这种电致伸缩材料制造的驱动器必须靠直流偏压进行极化处理,它不存在极性颠倒的问题,故没有滞后。

2. 驱动器的使用方法

驱动器的结构举例示于图2.55中。图2.55(a)和(b)均为单个使用的例子,图2.55(c)是将几个单个驱动器叠放在一起使用的例子,图2.55(d)、(e)和(f)是组合使用的例子。图2.55中的(a)和(b)的区别仅在于形状不同,其外加电场方向与位移方向相同。它们的外加电场有两种施加的方式:一种是根据各自的形状,让电场方向与位移方向一致,称为压电纵效应;另一种是让电场方向与位移方向垂直,产生压电横效应。图2.55中都是纵效应的例子。纵效应的压电常数是横效应的2~3倍,但是在结构上横效应在施加外部电场方面相对容易一些,使用时要留意其中的区别。这种方式大约产生亚微米级的位移,输出当然与外形尺寸有关。

图2.55(c)叫做叠层元件,加低电压就能获得较大的位移。由于应变与电场的强弱成正比,故常将若干个元件重叠起来使用,以便减小元件沿电场方向的尺寸,或者在相同电压条件下得到较大的应变,从而获得较大的位移。这种驱动器既有烧结制成的整体型^[2],

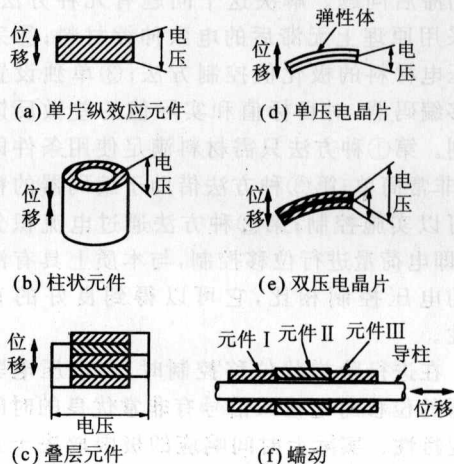


图 2.55 压电驱动器

也有多层粘接型(也被称为压电晶片堆)。它们可以实现数十微米到几百微米的位移。图 2.55 的(d)和(e)均是挠曲变形的例子。图 2.55(d)将一片压电元件与金属板粘接,称为单压电晶片,在电场作用下元件发生伸缩,金属板向阻挠伸缩的方向变形,结果发生挠曲。图 2.55(e)在粘接两片压电元件时,借助于极化,让一片收缩,另一片伸长,然后粘接,称为双压电晶片。此外,将 LiNbO_3 进行适当的热处理,让它处于一半极性颠倒的状态,这时在两个侧面施加电极也能起到双压电晶片的作用^[3]。借助于这些挠曲变形,驱动器能获得较大的输出变形,例如,从几微米到十几微米并不困难,但变形越大力越小。

图 2.55(f)叫做蠕动,由三个压电元件,即元件 I、元件 II、元件 III 组成。如图 2.55(f)所示,如果元件 I 缩短,它就抱紧导柱,在元件 III 伸长松开导柱的状态下伸长元件 II,接着缩短元件 III 抱紧导柱,然后伸长元件 I 使其与导柱脱开,在达到允许移动的状态时收缩元件 II,于是元件 I 就向右移动,在这种状态下再一次通过元件 I 抱紧导柱,缩短元件 III 使其达到能够移动的状态,重复以上动作,驱动器恰好像尺蠖虫那样向右蠕动。图 2.55 的(a)~(e)的方式能产生几微米到几百微米的位移,而图 2.55 中(f)的位移则可以比这更多。

3. 驱动器的驱动方法

实现连续位移控制,必须保证相对于输入的位移的直线性,为此,需要克服电场和应变的滞后问题。解决这个问题有几种方法:①采用原理上无滞后的电致伸缩材料;②采用压电材料的极化值控制方法;③单独设置位移编码器,对目标值和实际值的差做反馈控制。第①种方法只需材料满足使用条件即可,非常简单;第③种方法借助于编码器的精度可以实施控制;第②种方法通过电流积分值,即电荷量进行位移控制,与本质上具有滞后的电压控制相比,它可以得到良好的直线性。

在进行阶梯状位移控制时,要求压电驱动器的位移对电输入信号有非常优良的时间响应特性。实际上时间响应的极限取决于驱动器各自的固有共振频率,因此在设计时必须

注意这个问题。不过,设法采用适宜的输入波形,可以改善单一固有共振频率所决定的过渡响应。即使在连续位移控制的场合,系统的共振频率也是决定时间响应极限的主要因素。

2.4.2 超声波电机

1. 工作原理与方式

超声波电机的工作原理是用超声波激励弹性体定子,使其表面形成椭圆运动,由于其上与转子(或滑块)接触,在摩擦的作用下转子获得推力输出。如图 2.56 所示,可以认为定子按照角频率 ω 进行超声波振动,在预压 W 作用下,转子被推动。

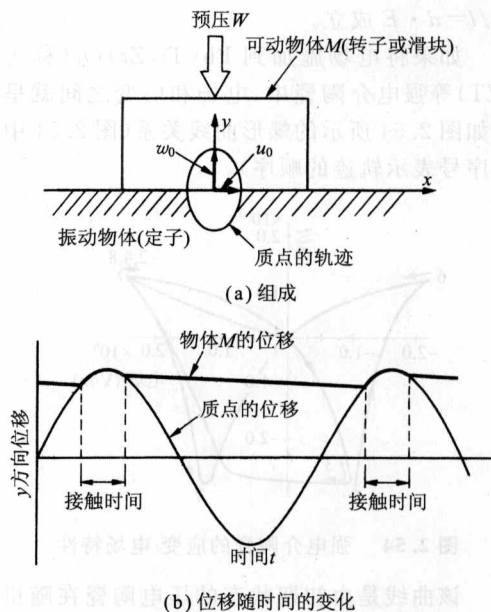


图 2.56 超声波电机的工作原理图

假定转子和定子接触部分的尺寸与定子在 x 轴方向上的位移分布相比足够小,同时表面上某一点所描绘的轨迹是椭圆形。转子(滑块)在完全跟踪定子运动时,应该做椭圆运动,而非单方向的运动。可是,如果振动频率高过 20kHz,转子就无法跟踪定子的运动,而是如图 2.56(b)所示,在一个周期的某一段时间内与定子接触,剩下的时间处于浮起状态。例如,假设定子仅仅在到达最高点的位置时与转子接触,而转子也只有在这个相位才通过摩擦得到推力,在其他相位都处于浮

起状态,结果它按照定子 x 轴方向上给出的最大速度做连续单方向运动。再者,键入轨迹是直线的,转子和定子只在最高点接触,那么脱离瞬间的速度就应该为零,不受横向力的作用。可是,这个瞬间的加速度最大,而且在实际上,如果注意转子和定子的某个点,从稍前于最高点处开始接触,在接触点降低的相位,转子由于惯性处于浮起状态,因此质点具有横向速度,并由此产生横向运动。

如图 2.57 所示,当振动体处于被行波激振的场合,定子表面的粒子以椭圆轨迹进行振动。如果转子尺寸比波长小,出现的情况就应该与前述相同;反之,如果转子的尺寸比波长大,那么转子就在波峰处始终与定子接触。可是,在应该承受反向推力的波谷,定子与转子是分离的,结果转子仅受一个方向的驱动力。

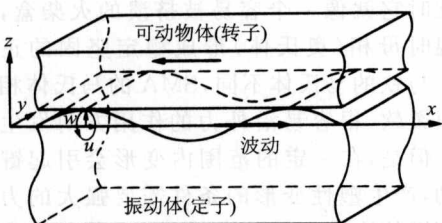


图 2.57 行波型超声波电机的原理

2. 超声波电机的典型实例

由上述可知,超声波振动系统是借助于定子产生摩擦力,使摩擦面上的点做椭圆运动的,根据超声波针对系统的不同组成方式,超声波电机可以分为驻波型、行波-模态旋转型、复合振动子型、模态变换型等几种。下面来举一些典型的例子。

图 2.58 中的(a)和(b)表示驻波型驱动的例子,表面粒子做直线运动,其方向和大小随接触的起始点在驻波中的位置的不同而异。当定子和转子完全接触时,驱动力与反向驱动力相等,相互抵消,转子不动作;但是如果像图 2.58 中的(c)和(d)所示,在定子的适当位置设置凸台,使转子和定子只有在该位置才能接触,结果转子就可以沿单方向移动,构成基于圆板和圆环挠曲振动的电机^[4]。鉴于这些电机通常很难反向旋转,所以有人提出调节频率改换振动模式以反向转动的方法。

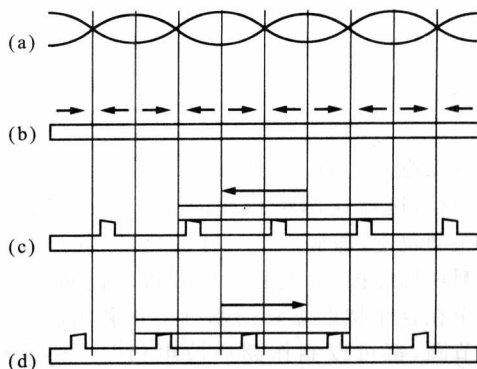


图 2.58 基于驻波挠曲振动的超声波电机^[4]

- (a) 位移振幅分布;
- (b) 驱动力的方向;
- (c), (d) 凸台的位置与转子移动方向

利用同一个共振频率激振不同振动模式也能实现椭圆运动,利用这一原理同样能构成超声波电机。例如,将带孔圆板的轴对称模式和非轴对称模式进行组合,在压电圆周上的特定点能得到所需要的椭圆轨迹,在这个点与转子接触,转子就能转动^[5]。

在一个振动体中装入激励纵向和挠曲振动的压电元件,使两者的共振频率一致,把转子连接到机械端子上就得到一个复合振动型超声波电机,如图 2.59 所示^[6]。这时,振动体与驱动器的驱动电压是独立控制的,允许其自由改变驱动轨迹。这样,在低速段也能获得稳定的动作。比如,外形为 50mm,共振频率为 18kHz 的电机可以达到转速为 100 r/min,最大扭矩为 0.7N·m、效率为 33% 的效果。

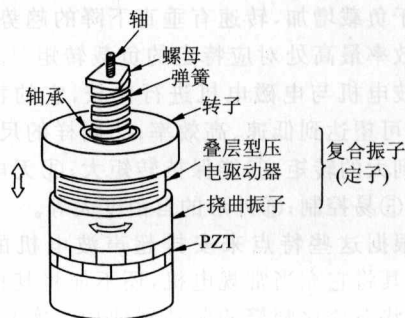


图 2.59 复合振动子型电机的组成

行波(使驻波旋转得到)模态旋转型超声波电机已经得到实际应用。图 2.60 给出了一个基于圆环轴向挠曲振动的超声波电机的

具体结构示例,以及定子振动振幅的分布情况^[7]。根据所设计的激励态的阶次划分压电元件,将它们与定子底面固定,激励2组圆周方向呈 n 次的行波,让它们各自位移振幅的相位无论在时间上还是在空间上都呈现 $\pi/2$ 的偏移,这样这两组行波的合成运动将会给出振动轨迹,即椭圆形。除此之外,如果改成让圆环伸缩振动,或者改成圆板的挠曲振动,甚至在这个挠曲振动的基础上再利用沿半径的节圆,都可以制作超声波电机^[7]。如果利用行波,因为它没有振动波节,所以既要设法消除振动约束,又要防止其性能的退化。至于超声波电机的驱动方法,一般都采用二相驱动,如果选用同型振动模式(防止退化)超声波电机,那么可以将其改成单相驱动^[8]。也有人提出采用行波原理的直线电机^[9]。

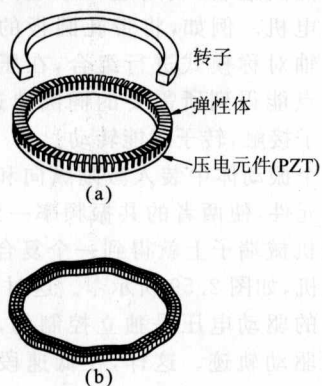


图 2.60 模态旋转型电机

3. 超声波电机的特征和使用事例

超声波电机的负载特性与 DC 电机相似,相对于负载增加,转速有垂直下降的趋势,因此有效率最高处对应特定的负载转矩^[6]。将超声波电机与电磁电机进行比较,它的特点有:①可望达到低速、高效率;②同样的尺寸,能得到大的转矩;③能保持转矩大;④无电磁噪声;⑤易控制;⑥外形的自由度大等。

根据这些特点来安排超声波电机的应用,与其将它充当常规电机,还不如将其作为开、停状态变化频繁的驱动器使用。实际上,灵活地应用这些特征,再加上摩擦力的时间控制方法,已经有不少实际应用的事例。例如,基于圆板驻波挠曲振动的钟表驱动电机^[10]、基于 π 型直线电机的 $x-y$ 平台、作为自动聚焦驱动器使用的圆环行波型电机和圆柱

挠曲振动模态旋转型电机以及基于自由-固定悬臂式挠曲振动模态的旋转电机等。

上羽贞行

2.4.3 形状记忆元件

形状记忆效应(SME: Shape Memory Effect)是指使某一金属变形到一定程度,加热后能恢复到原来形状的现象。称显著具有这样性质的 Ti-Ni、Cu-Zn-Al 类合金为形状记忆合金(SMA: Shape Memory Alloy)。SMA 的形状恢复变形能达到普通金属材料的弹性极限的数十倍,与压电材料等其他固体驱动器相比,从大变形角度看不仅数量级不同,从小变形的角度看它也能实现原子单位量级的微小动作。

参考图 2.61 的概念模型,就很容易理解 SME。在低温时马氏体具有相稳定特性,不过此时它就像一个容易被挤溃的火柴盒,在高温时母相(奥氏体)形成稳定坚固的正方形。与铁的马氏体不同,SMA 的马氏体相组织很柔软,很容易沿外力的作用方向发生变形。但是,在一定的范围内变形会引起键的运动,产生塑性变形的条件需要强大的力来破坏键的连接。利用外力让马氏体相变形后再经过加热,它就转变成坚固的母相,从而恢复变形。如果冷却,它就再一次返回到易变形的马氏体相,此时如果没有外力,形状就不再发生变化。之所以从温度改变,是因为在 SMA 内部产生力,刚度变化。

变形或形状恢复依赖于相变引起的内部应力的变化。母相变化温度与马氏体相变化温度有一些偏移,这种偏移叫做温度延滞。表示 SMA 温度特性的值一般使用 A_s 点,用材料的马氏体相变化到母相的相变结束温度表示 A_s 点就足够了。实际的相变点随加工热处理和载荷大小的变化而变化。以往复运动驱动器为例,需要已知设定载荷状态所对应的 M_s 点(马氏体相变开始温度)和 M_f 点(马氏体相变结束温度)。只是简单地让 SMA 记忆希望的形状,那么只要在变形后约束住形状,将其加热到超过恢复再结晶温度就可以了。可是,SMA 随成分的微小差异、加工热处理、调质处理的不同,性质差异就会很大,因此制作高性能 SMA 需要专门的知识 and 处理设备。在付诸实用之前,最好要么与专业

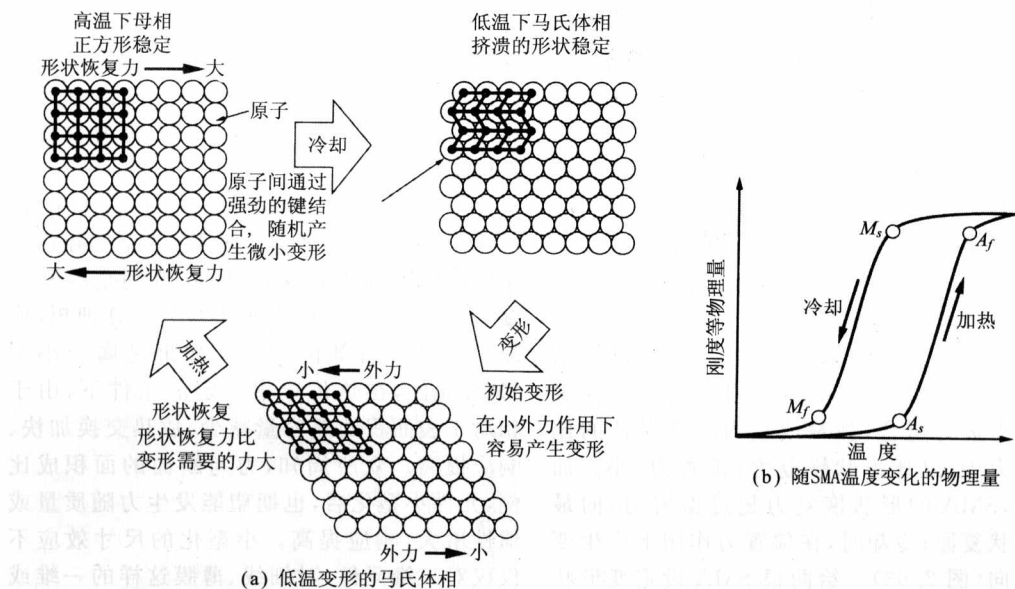


图 2.61 形状记忆效应的概念模型

材料制造厂家进行咨询,要么选择那些事先经过处理,专门供驱动器使用的 SMA 材料。

与低温变形力相比,SMA 在高温时产生的形状恢复力是相当大的,也就是说它能把热能转化成机械能。甚至靠仅仅数十度的温差,运动就能显现出来,所以人们曾经一度热衷于将它应用于热动力装置的研究。问题是

它的尺寸无法做得过大,它的疲劳寿命不高,妨碍了它的实用化。现在,大部分形状记忆合金被用作靠温度驱动的温度作动元件。Ti-Ni 类的 SMA 有接近于镍导线的电阻,所以可以将其制成直接通电加热(电偶加热)或感应加热的运动驱动器。这时低电压、比较大的电流比较合适。

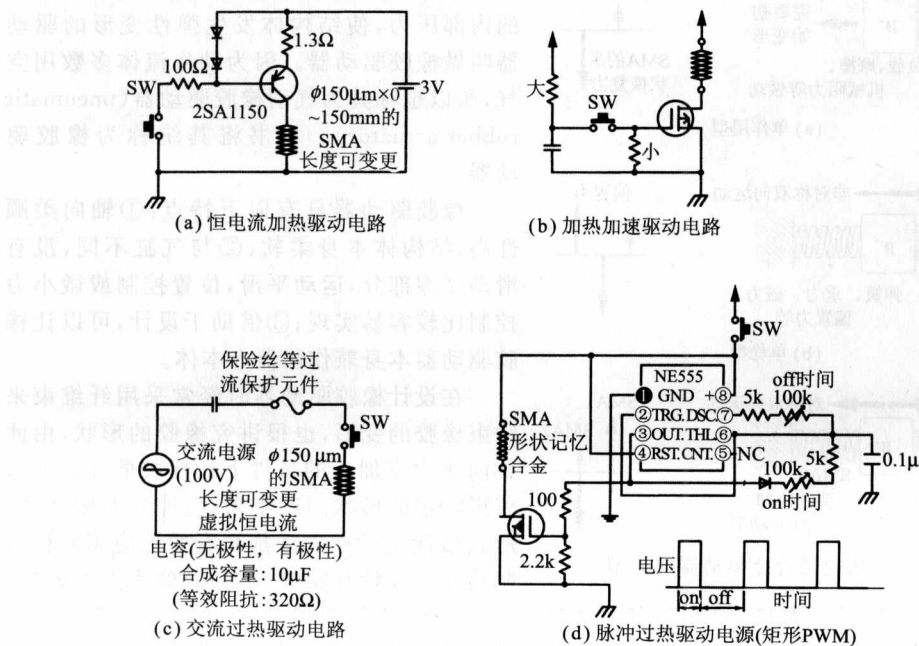


图 2.62 各种电加热电路

图 2.62 给出了各种通电加热电路的例子。从效率上讲,可以进行电流电压变换,由于脉宽变调(PWM)的线性调整很方便,实施功率控制是很有效的。过度加热 SMA 有损于形状的记忆或运动的变形,缩短了驱动器的寿命。为了防止过热,最好在形状恢复前就停止通电。实施运动应变或形状恢复反馈控制也是一个有效的办法,为此,最简单易行的传感器就是触点(图 2.64)。图 2.62(b)的加速电路既可以提高开环响应,还可以抑制过热现象。SMA 的基本使用方法是与弹簧或重力进行组合,弹簧或重力应该设计的比变形力大,又比形状恢复力(偏置力)小。加热时,SMA 的形状恢复力超过偏置力,向最初形状复原;冷却时,在偏置力作用下产生变形倾向(图 2.63)。给两根 SMA 设定变形状态并使其彼此抗衡,交替加热冷却,就构建了一个差动驱动器。但是,如果将两根 SMA 简单地组合,不进行完全冷却,由于它们的抗衡作用,彼此之间将产生很大的应力有时会导致两败俱伤。值得注意的是,即便已经让应变相当充分了,但是直观上总是很难判断大变形后 SMA 形状恢复力可能超过材料强度的性质,而这种隐患对其寿命有直接影响。

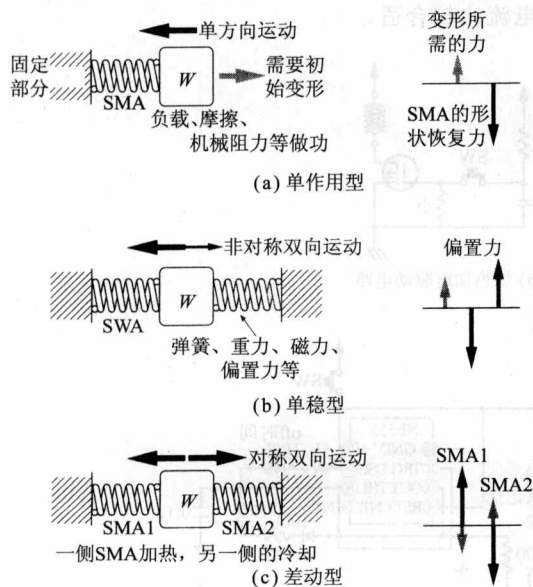


图 2.63 形状记忆合金驱动器的类型

图 2.64 举出了一些避免 SMA 有害过载或过热的机构示例。SMA 的大变形不具有稳定的可重复性,所以实际驱动器的应用场

合一般利用绕制线圈、薄板、线材的弯曲将微小应变放大。使用拉伸线材,在形状的管理方面很简单,易通电,应力均一,允许有效地输出力,不过获得的变形比较小,需要位移放大机构(图 2.65)。

人们对 SMA 的强烈印象是它动作缓慢。实际上,SME 本身的动作很快,决定实际运动速度的因素在于热交换速度,特别是冷却速度。通电加热时,其速度基本上还算理想,冷却时却尚无有效的方法。如果是属于小型 SMA 元件,在热传导率一定的条件下,由于相对于表面积的热容量减少,故热交换加快、响应提高。众所周知,力与断面的面积成比例,元件小型化后,也期望能发生力随质量或惯性增大,响应提高。小型化的尺寸效应不仅仅对三维元件,对细线、薄膜这样的一维或二维元件也很适合。这些特性表明,SMA 是很适合小型化的驱动器。还应该注意的,化学的影响在元件小型化的进程中将加剧。例如,Ti-Ni 类合金虽然属于耐腐蚀合金,但是在强酸中易引起氢脆化。

本间 大 三轮敬之

2.4.4 橡胶驱动器

利用橡胶等易变形材料,制作具有内部空间(称压力室)的结构物,通过调整压力室的内部压力,使结构体发生弹性变形的驱动器叫做橡胶驱动器。因为动作流体多数用空气,所以也称其为气动橡胶驱动器(pneumatic rubber actuator)。本书将其统称为橡胶驱动器。

橡胶驱动器具有以下特点:①轴向柔顺性高,结构体本身柔软;②与气缸不同,没有滑动摩擦部分,运动平滑,位置控制或微小力控制比较容易实现;③借助于设计,可以让橡胶驱动器本身兼作机器人本体。

在设计橡胶驱动器时经常采用纤维束来约束橡胶的变形,也很讲究橡胶的形状,由此在向压力室加压的条件下让橡胶的弹性变形获得特定的形状。近年来,超弹性有限元法、形状最优化设计方法都被有效地应用到橡胶驱动器设计开发中^[11],使其效率大大提高。

另外,人们对结构体纤维的缠绕方法也进行了实验研究。总之,正在系统地推进相关研究^[12]。

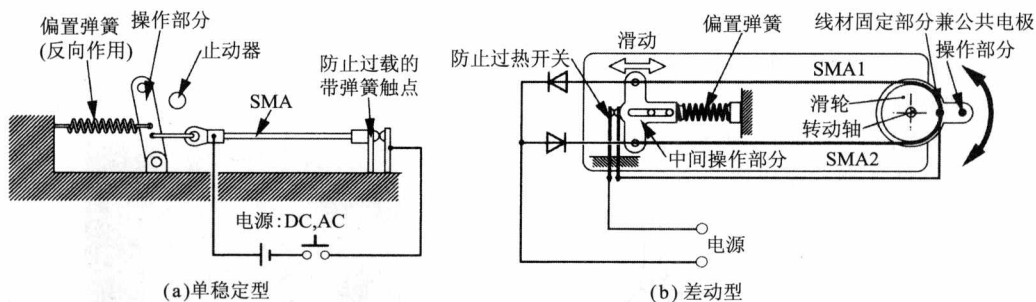


图 2.64 防止过载过电流的机构实例

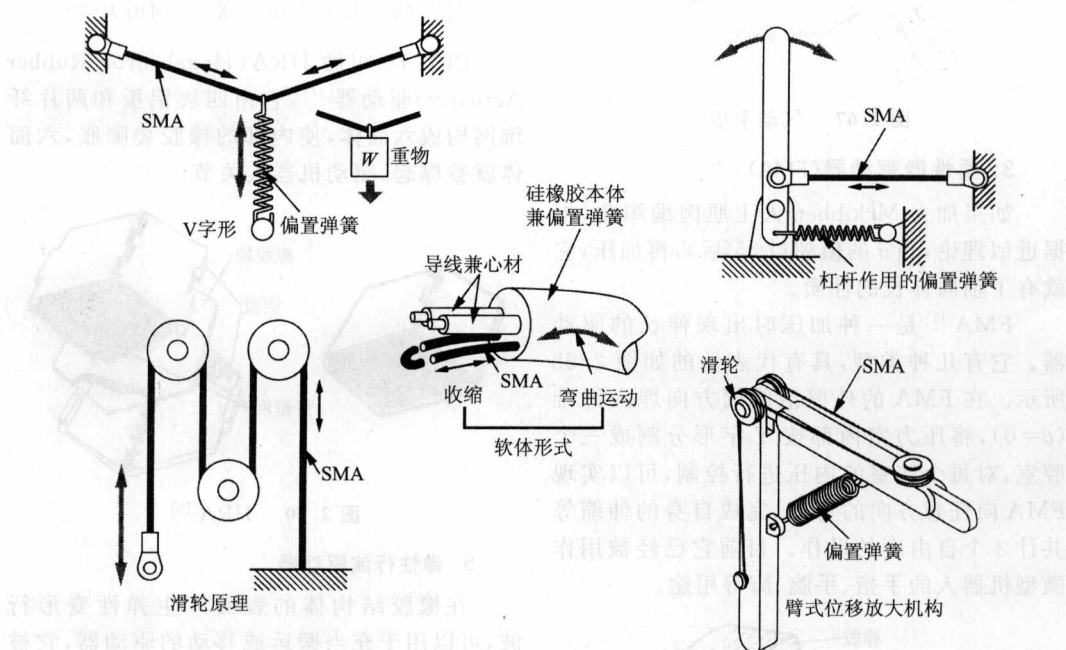


图 2.65 位移放大机构方法举例

从早期开始,针对橡胶驱动器已经提出过不少方案,试制了不少样品结构。按照动作形态可以分为膨胀、伸缩/伸长、摆动、转动、弯曲、行波生成、多自由度动作等。

由于篇幅的限制,本书就其中最新开发的,与机器人有关的驱动器加以介绍。

1. McKibben 人工肌肉

20 世纪 50 年代末期,美国开发了 McKibben 人工肌肉^[13],80 年代的日本制造厂家成功地将其可靠性、耐久性加以提高,生产和销售以“rubber actuator”命名的橡胶驱动器商品^[14]。

这个驱动器如图 2.66 所示,橡胶管的外周套有纤维编织网状套(尼龙等纤维编织成的筒状网)。编织角(相对于橡胶管中心轴的

编织角度,图中的 θ 在 $25^\circ \sim 40^\circ$ 范围内。

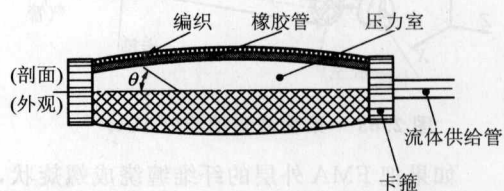


图 2.66 McKibben 人工肌肉

如果对橡胶管内施加空气压,橡胶管就沿着径向膨胀,同时产生轴向的收缩力。反之,如果将其返回大气压,驱动器就会松弛。因此,大多数情况下需要两只人工肌肉驱动器按照对抗形进行布置。截至目前,它们已经被用于护理机器人、喷涂机器人等。

2. 气动手指

法国厂家开发了以机器人手指为应用目标的驱动器商品(图 2.67)。对压力室提供空气压力,皱褶面产生膨胀,驱动器弯曲,于是沿被抓持物体的形状完成弯曲动作。

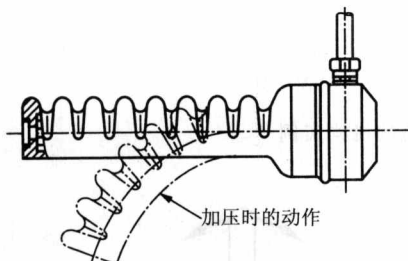


图 2.67 气动手指

3. 柔性微驱动器(FMA)

如果加大 McKibben 人工肌肉编织角(根据近似理论,当 θ 的值超过 55° 后),再加压,它就有了轴向伸长的性质。

FMA^[15]是一种加压时出现伸长的驱动器。它有几种类型,具有代表性的如图 2.68 所示。在 FMA 的外壁沿圆周方向埋入纤维($\theta=0$),将压力室内部按 Y 字形分割成三个腔室,对每个腔室的内压进行控制,可以实现 FMA 向任意方向的弯曲,完成自身的伸缩等共计 3 个自由度的动作。目前它已经被用作微型机器人的手指、手腕、脚等用途。

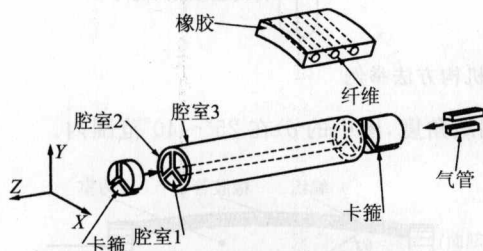


图 2.68 柔性微驱动器(FMA)^[15]

如果把 FMA 外层的纤维缠绕成螺旋状,还能够实现绕轴的转动^[15];如果在截面形状的设计上再下一点功夫,甚至不必掺入纤维,就能在结构上实现弹性的各向异性^[11]。总之人们已经开发了好几种 FMA。

4. 摆动型

图 2.69 和图 2.70 举了两个例子,将橡胶驱动器输出摆动运动直接驱动机器人的关节。

图 2.69 所示的驱动器^[16]由橡胶制作的

扇形圆弧部分和两块侧板组成,外部的纤维用来约束扇形圆弧部分的径向变形。施加内压,能开启扇形部分实现摆动动作。

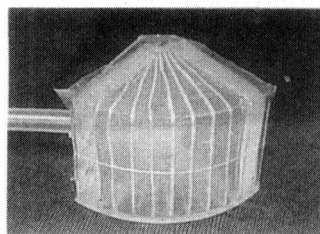


图 2.69 摆动型驱动器^[16](冈山大学)

图 2.70 叫做 HRA(Hexahedron Rubber Actuator)驱动器^[17],它由四块铝板和两片纤维网构成六面体,使内部的橡胶袋膨胀,六面体就被撑起,驱动机器人关节。

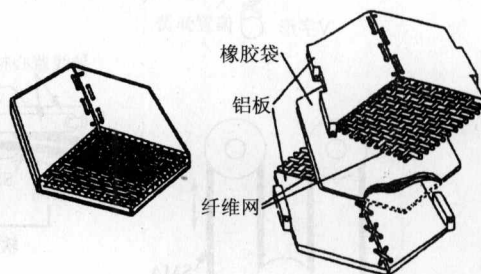
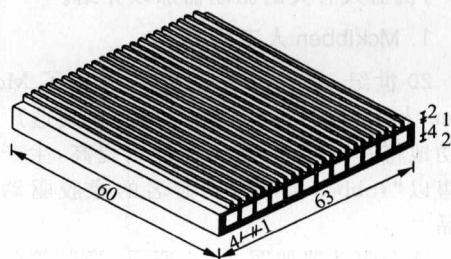


图 2.70 HRA^[17]

5. 弹性行波驱动器

在橡胶结构体的表面产生弹性变形行波,可以用于充当搬运或移动的驱动器,它被叫做弹性行波驱动器。图 2.71 称为气泡驱动器(bubble actuator)^[15],它是一片内部带有压力室的橡胶板,往压力室顺次加入压力,就可以产生动作。利用这个原理,人们已经开发了夹在两个壁面上的狭长空间中移动的机构。

另外,人们正在研究利用橡胶球组合的驱动器,将它用于移送病人的搬运床^[16]。



(外形尺寸仅是样机的特例,单位:mm)

图 2.71 气泡驱动器^[15]

2.4.5 静电驱动器

静电驱动器(electrostatic actuator)是利用带电体之间产生的静电力(electrostatic force)实现动作的驱动器。早在18世纪曾经有人试制过一些静电驱动器的样机^[18],由于难以获得大的驱动力,后来就作罢了。直到20世纪80年代后期,随着微机械研究的盛行,因为它属于适合微型化的驱动器,所以再次引起人们的关注,进入一个新的研究活跃期。

把静电驱动器应用于机器人的研究有以下几个方面:①振动型加速度传感器、陀螺仪振子驱动器;②微机器人驱动器;③基于薄膜型静电驱动器叠层的肌肉型驱动器等。

静电驱动器一般的特点是:①具有比较简单的平面结构;②伴随着微型化,单位体积的发生力增加;③适合薄膜成形,即所谓的刻饰微细加工;④可以薄型化和多层化;⑤保持动作时不消耗能量等。

静电驱动器有各种各样的形式,目前开发的静电驱动器绝大部分是基于在相对的电极之间施加电压,储蓄电荷,从而得到静电力的结构。它们的基本原理和特性可以借助于图2.72的平板电极模型来进行说明。图2.72中的箭头表示电力线,在其收缩的方向上产生吸引力,这时在两个电极之间的作用可以分为:①向缩小电极间隔 d 的方向(极板的法线方向)运动的作用;②向增加对置极板面积的方向横向移动(平行极板方向)的作用。基于不同的作用机理,驱动器的设计及性质就随之发生改变。

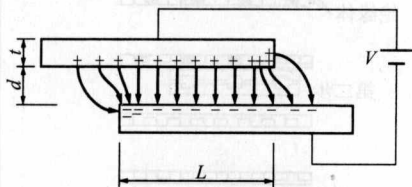


图 2.72 平板电极的带电与静电力

我们还应该注意图2.72中电荷在电极表面引起的力不依赖于电极的厚度 t ,静电驱动器所具有的上述特点很多都是出自这个原因。

下面给出几个静电驱动器的实例。

1. 可变间隙型静电驱动器

在图2.72中,如果在极板法线方向上动子可以移动,这种静电驱动器叫做可变间隙型静电驱动器。这种驱动器的动子多数由细梁提供弹性支撑,利用梁的挠曲实现移动。例如,它们在光信息装置的镜面扫描、流体控制阀等中得到了应用。这种静电驱动器虽然能提供比较大的力,但它也有缺点,如调节范围小,静电力随移动位置的变化而波动严重等。

图2.73的可变间隙型静电驱动器可归为一种直线驱动器^[19]。两片定子各带有一个长方形电极,动子位于定子之间,按照图示顺序进行动作。

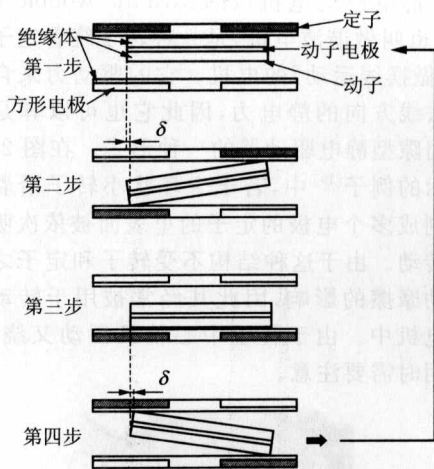
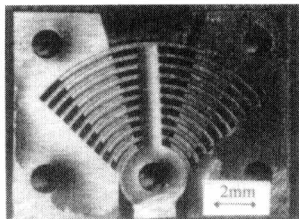


图 2.73 可变间隙型静电驱动器

2. 可变电容器型静电驱动器

在图2.72中,利用电极沿着与极板平行方向移动的原理制作的静电驱动器就叫做可变电容器型静电驱动器。有时从广义上讲,连上面介绍的可变间隙型静电驱动器也都可以归入可变电容器型静电驱动器。

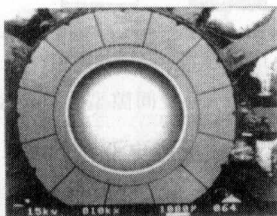
图2.74是可变电容器型静电驱动器的一个例子^[20],带有圆弧形梳齿状电极的两个定子与动子之间的间隙仅仅为 $50\mu\text{m}$ 。动子在滑动轴承支撑下旋转,如果给动子和定子之间一个电位差,梳齿形电极就被吸引插入彼此的间隙中。

图 2.74 可变电容型静电驱动器^[20] (东芝)

与可变间隙型静电驱动器相比,可变电容型静电驱动器发生力比较小,但动作范围大,并且随动子位置的变化发生的力波动小。不过,如果电极之间发生接触,会引起摩擦,导致驱动器无法正常工作,因此在设计上的一个关键问题是如何保持电极之间的间隙。

3. 静电摆动电机

静电摆动电机(electrostatic wobble motor)也叫做谐波电机,是一种转子绕着定子转动(做摆线运动)的电机。它的驱动力来自电极法线方向的静电力,因此它也可以算是可变间隙型静电驱动器的一种形式。在图 2.75 所示的例子^[19]中,若干个环状小转子沿着被分割成多个电极的定子的里表面被依次吸引并转动。由于这种结构不受转子和定子之间滑动摩擦的影响,因此其经常被用于转动型微电机中。由于转子中心轴既摆动又绕圈,使用时需要注意。

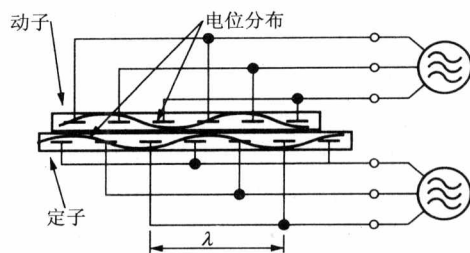
图 2.75 静电摆动电机^[19] (东芝)

4. 薄膜型静电驱动器

静电驱动器发生力不依赖于它的厚度,如果利用这一特性做成薄膜状的驱动器,那么就可以组装成超薄型、柔软的驱动器。进而把薄膜型驱动器叠层使用,就能成为力密度很高的驱动器。

图 2.76 就是薄膜型静电驱动器的一个例子^[21]。在两个绝缘薄膜内部各有带状电极,如图 2.76 所示施加频率不同的三相交流电压,在电极之间就会产生反力和横向驱动力,使薄膜产生相互的横向移动。该电机的特点是利

用电极之间的反力,减少薄膜之间的摩擦力。

图 2.76 薄膜型静电驱动器^[21]

5. 步进直线驱动器

图 2.77 所示是一种利用平行力的驱动器^[19]。梯子形的动子(slider,硅材料,厚度 0.2mm)夹在两片定子之间进行运动。定子中有宽 $45\mu\text{m}$ 、厚 $0.2\mu\text{m}$ 的梳形电极。图 2.78 解释了该驱动器的工作原理,施加电压的电极用网格表示。如图 2.78 所示,由于上、下定子电极之间彼此互相错开半个齿的位置,动子在定子之间既上下振动($15\mu\text{m}$),又左右移动($\pm 1\text{mm}$)。动子的上下运动有利于解决定子与动子之间的摩擦问题。

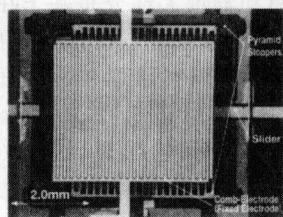
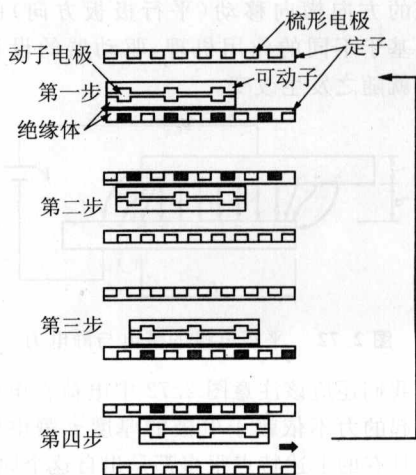
图 2.77 步进直线驱动器^[19] (东芝)图 2.78 步进直线驱动器的工作原理^[19]

图 2.80 各种 MH 合金中温度与平衡氢气压的关系

可见,如果在加热/吸热的过程中控制热能,就能得到需要的氢气压力。压力作为机械能够充当 MH 驱动器的驱动力(metal hydride actuator)。也就是说,基于调节 MH 合金温度使平衡氢气压实现可逆变化这一特性的驱动器就是 MH 驱动器。

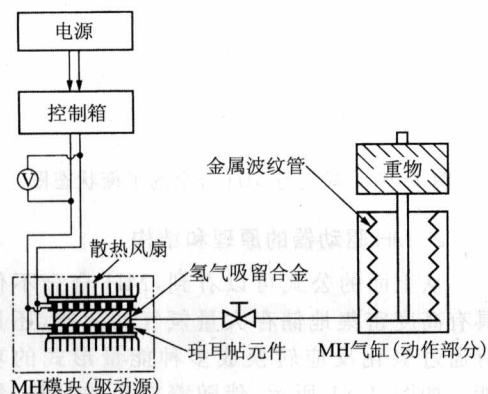


图 2.82 MH 驱动器的基本结构

可以通过如图 2.82 所示的基本结构,将上述原理的驱动器实用化。该结构由以下几部分组成:①设计 MH 模块结构,该模块将 MH 合金夹在珀耳帖元件之间,实现了 MH 合金温度的电气控制;②将 MH 模块封装入 MH 容器之中;③把氢气压转换为外部驱动力的金属波纹管式 MH 气缸。使用金属波纹管的理由是在把氢气压变换为驱动力的时候,需要事先把氢气密封在 MH 驱动器的内部。

3. MH 驱动器的工作特性

从工作原理可以看到,MH 驱动器的响应速度取决于 MH 合金层的热传导率。一般来说,MH 合金吸留氢气后呈微粉状,热传导率不好。于是,在装入 MH 模块时,应该先将 MH 合金粉末封装成带铜皮外膜的微胶囊,再压缩成型。为了使它与珀耳帖元件之间迅速实现热转换,在压缩固形化的合金表面喷镀一层 Al_2O_3 绝缘层,然后上面制作珀耳帖元件电路的铜模板,将 MH 合金与珀耳帖元件集成起来。图 2.83 表示了模块化的过程^[24]。

通过以上工艺制作的 MH 驱动器如图 2.84 所示^[25]。该驱动器中的 MH 合金是 CaNiMmAl 合金,每个 MH 模块为 6g。工作压力取为 0.1Pa~1MPa,与高压气体的限制。

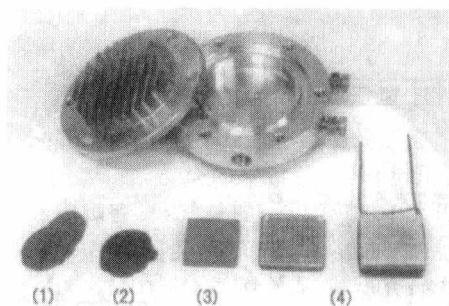


图 2.83 MH 容器与 MH 模块的制作工艺
(日本制钢所,东京大学)

- (1) MH 合金粉末;
- (2) 用铜皮外膜制作微胶囊;
- (3) MH 合金的固化;
- (4) 喷镀绝缘层并与珀耳帖元件一体化

图 2.84 中天平式的结构设定负载质量为 50kg,驱动器内部的初始压力设定为 0.34MPa,工作特性如图 2.85 所示。在上举重物时,驱动器需要花费 7s 的时间使内部压力上升至 1MPa,稍稍慢一些。可是,如果从珀耳帖元件通电时刻到内部压力开始上升时刻,延迟了大约 0.5s,这就证明,经过制作工艺改进后的 MH 驱动器的响应特性比早期的 MH 驱动器^[26]已经得到改善。

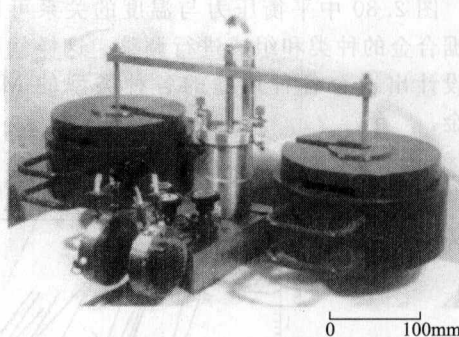


图 2.84 MH 驱动器的外观
(日本制钢所,东京大学)

4. MH 驱动器的特点与应用领域

从 MH 驱动器驱动原理来看,它具备一些液压、气动驱动器及电机所没有的特点。

①少量 MH 合金即可获得大量机械能,驱动器体积小、质量轻。例如,图 2.84 所示的装置中,单位合金质量的输出为 40.8N/g。它比其他驱动器的输出质量大。

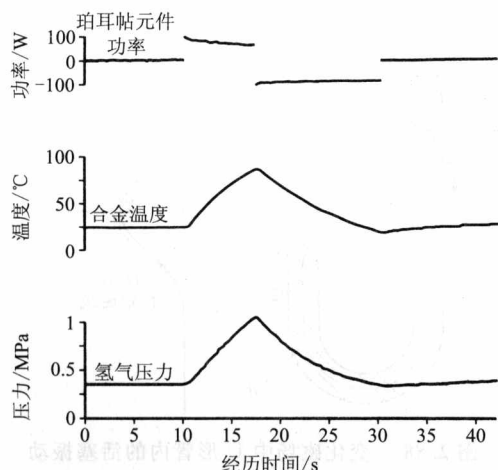


图 2.85 MH 驱动器的工作特性

② 通过彼此可逆的氢化反应和氢气放出反应,把热能转换为机械能,基本上不产生噪声和振动,动作平稳。

③ MH 合金-氢气系统本身有缓冲作用,能承受冲击和过载。驱动器本身具有柔软性,如果将驱动器像人类的肌肉关节那样配置成彼此抗衡的驱动形式,很容易实现柔顺控制^[27]。

可是从另一个角度看,与其他典型的工业驱动器,如电机等相比,它的高速性、效率(功率/消耗电力)较弱。

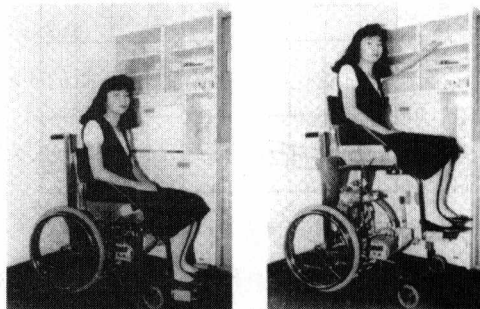
根据它的优、缺点,使用 MH 合金驱动器时应该重点考虑小型、轻质、柔软、静音的生活辅助装置及铠装机器人等领域。

举例来讲,目前研发的有座席升降轮椅(图 2.86)^[28]、西式卫生间座便器升降装置^[29]、移栽护理支援系统^[30,31]、上肢和下肢关节动作训练装置(CPM 装置)^[32]、虚拟现实的力显示器等^[33]。

作为特殊用途,可以列举出给水设施阀门紧急切断用的蝶状阀的闭锁器^[34],能满足大输出和高可靠性要求。人们也期待将它用于超低速、大输出的海底作业机器人,以及超小型医用微型驱动器。

目前,人们正在积极地开发更加优质的 MH 合金,它将是用燃料电池提供的清洁、可再生的氢能量媒体,同时 MH 合金的性能也将进一步得到提高。

井野秀一



MH合金:40g,最大输出:800N,升降速度:2cm/s

图 2.86 MH 驱动器升降轮椅
(日本制钢所,东京大学)

2.4.7 磁流体驱动器

1. 什么是磁流体驱动器

磁流体驱动器是当前正在研究的一种新的驱动器,它的工作原理是把新开发出来的磁流体(能与磁铁产生反应的流体)用于驱动,以便开拓出与传统驱动方式有区别的应用领域。它的特点是驱动器由流体构成,可以自由改变界面的形状,而且很容易从外部通过非接触方式操作驱动部分发生微小变形或微小运动^[35,36]。

本节首先介绍应用磁流体驱动器时相关的磁流体力学,然后讲解驱动器的工作原理和基本特性。

2. 磁流体力学

磁流体是把大量强磁性磁体(铁、钴等)微粒(直径约为 10nm)分散在水、煤油等液体中得到的胶质溶液,它属于一种固液混合流体。不过,它与通常的固液混合流体不同,由于粒子表面经过处理,彼此之间不产生凝聚,而且在布朗运动作用下微粒也不会因重力而下沉,因此它能维持稳定的分散状态。从表面上看,这样的液体表现出液体本身具有强磁性,如果把它放置于非均匀磁场中,就受到磁力(体积力) F_m 的作用^[35,36]。

$$F_m = \mu_0 M \nabla H \quad (2.20)$$

式中, ∇H 为磁场梯度; M 为磁化强度; μ_0 为真空中的磁导率。

因此,静止流体中的两点之间(磁场强度为 H_1 和 H_2 ,而且不受重力影响的场合)存在的压力差为

$$\nabla p = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH \quad (2.21)$$

磁流体的磁化特性可以通过下面的 Langevin 函数进行说明^[35]:

$$M = nmL(\mu_0 m H k T) \quad (2.22)$$

式中,

$$L(\xi) = \coth \xi - \xi^{-1} \quad (\text{Langevin 函数})$$

$$\xi = \frac{\mu_0 m H}{k T} \quad (2.23)$$

式中, n 为粒子数密度; m 为粒子的磁矩; k 为玻尔兹曼常量; T 为热力学温度。

3. 磁流体驱动器的工作原理

人们提出了各种磁流体驱动器的发展方案,其大致分类如图 2.87 所示,有图 2.87(a) 利用磁流体柱塞的往返运动;图 2.87(b) 利用磁流体中非磁体的运动;图 2.87(c) 利用磁流体界面的变形运动^[36]。

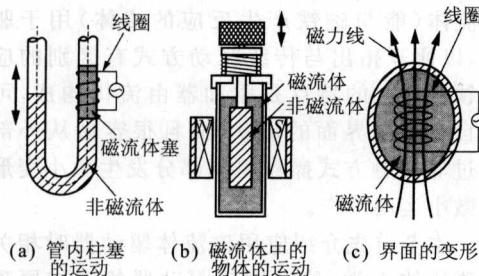


图 2.87 磁流体驱动器的工作原理

4. 驱动器的基本特性

我们借助于图 2.87(a) 所示的工作原理来说明磁流体驱动器的基本特性。图 2.88 表示,在非均匀磁场中 U 形管内有一段长度为 l_m 的磁流体,通过水把磁流体柱塞的振动传递给带有弹簧负载的活塞^[37]。

首先考虑只有磁流体柱塞的情况。当给定作用在磁流体柱塞上的磁场强度为

$$H(z, t) = H_0(z) + \Delta H(z) \cos \omega t$$

时,磁流体柱塞的振动运动方程式,即为下式^[37]:

$$\rho l_m \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{\rho l_m \lambda |v| v}{2d} - \rho g l_m - \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH = 0 \quad (2.24)$$

式中, λ 为管摩擦系数; v 为平均流速; l_m 为柱塞的长度; d 为管径。

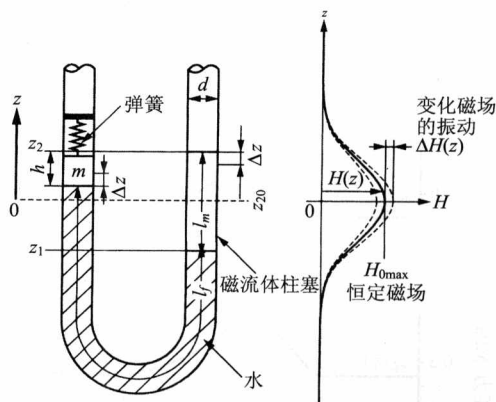


图 2.88 变化磁场中 U 形管内的活塞振动

因此,得到振动振幅为

$$\Delta z^* \left(= \frac{\Delta z}{d} \right) = A_p^* \cos(\omega t^* - \delta) \quad (2.25)$$

其中,

$$A_p^* \left(= \frac{A_p}{d} \right) = \frac{F}{\sqrt{p^2 - \omega^2}} + 4\alpha_1^2 \omega^2 \quad (2.26)$$

$$\delta = \arctan \left(\frac{2\alpha_1 \omega}{p^2 - \omega^2} \right) \quad (2.27)$$

式中, F 为激振力; α_1 为衰减系数; $p = \sqrt{\alpha_2 k_c}$ 为固有频率,其中 k_c 为弹簧常数, α_2 为 $nkT/\rho g l_m$ 。

接着如图 2.89 所示,举一个例子说明将上面的柱塞共振运动传递给图 2.88 中活塞的运动时,如何通过实验求出活塞的振动特性^[37]。图 2.89 中,给定柱塞上端的位置 z_{20} 为 0mm, 5mm, 10mm 的三种情况,弹簧常数 $k_c = 18 \text{ N/m}$, $l_m = 40 \text{ mm}$, $l_i = 300 \text{ mm}$, 活塞质量

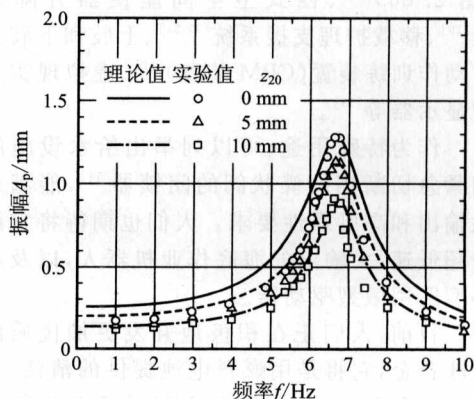


图 2.89 柱塞上端位置对共振特性的影响

$m=0.48\text{g}$ 。图 2.89 中也记入了理论值。考虑活塞密封引起的壁面摩擦阻力的影响,对理论值进行修正,就基本上可以说明实验结果。

5. 磁流体驱动器的结构

图 2.90 所示的磁流体驱动器的结构是向线圈 1、线圈 2 交替提供电流控制磁流体往复运动,起到流体泵的作用^[38]。隔膜是软质的,能起到把磁流体的柱塞运动传递给外部流体的作用。另一种利用磁流体界面变形的驱动器结构如图 2.91 所示^[39]。该装置给封装在柔软膜腔内的磁流体施加磁场,能感应起人工肌肉的动作。

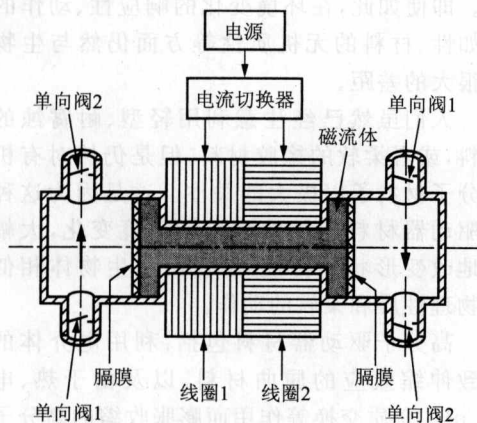


图 2.90 磁流体柱塞泵

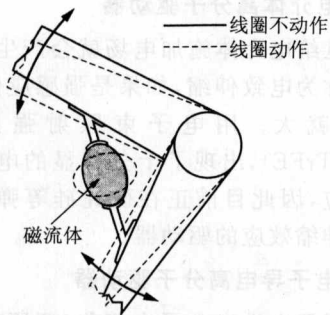


图 2.91 磁流体人工肌肉关节的运动控制

神山新一

2.4.8 ER 流体

1. 工作原理

ER 流体(electrorheological fluid)是靠外加电场能够控制表观黏性的流体。这种流体的特点就是黏度的变化范围广,响应好^[40,41]。ER 流体粗略地可以分为粒子类和均匀

类^[40~45]。在粒子类的流体中,未施加电压前粒子处于分散状态,一旦施加电压后它们便形成粒子桥(图 2.92)。只有切断粒子桥,上、下电极才允许有相对速度,产生左右相对移动。剪切速度与剪切应力的关系如图 2.93 (a)所示。也就是说,粒子类流体呈现宾厄姆流体的性质。另外,一种已开发出来的均匀类 ER 流体就是大家熟知的高分子液晶,它具有如图 2.93(b)所示的特性。由图 2.93(b)可知,均匀类的 ER 流体呈现牛顿流体的性质^[45,46]。

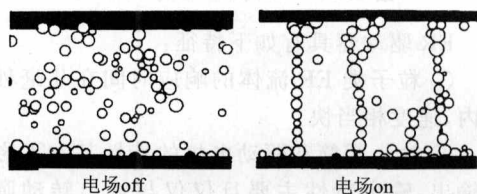


图 2.92 粒子类 ER 流体的原理

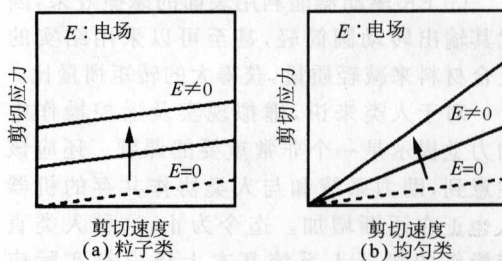


图 2.93 粒子类及均匀类 ER 流体的特性

从 ER 流体的性质可知,用这种流体可以制作借助于电场控制的转矩控制型离合器和借助于电场控制制动转矩的高性能制动器^[44,45]。它们还可以制作借助于电场控制流量的无可动部件控制阀^[41~44]。另外,均匀类流体自身具有使控制系统稳定的微分动作效果,这将十分适合精密定位控制和振动控制^[44,45]。

2. ER 驱动器

图 2.94 给出 ER 离合器的工作原理。在输出转动圆筒和输入转动圆筒之间充满 ER 流体,输出转动圆筒和输入转动圆筒分别带有负极、正极。输入转动圆筒由电机及减速器驱动按一定的速度回转。从电机来的输入转矩通过两个圆筒之间填充的 ER 流体,被传递到输出转动圆筒。改变施加在两个圆筒(电极)之间的电场可以控制输出转矩。ER

离合器和输入圆筒驱动部分构成的系统被称为 ER 驱动器。由于需要正、反转双向转矩,所以应该将正、反转两个 ER 驱动器组成一组使用^[45,47]。

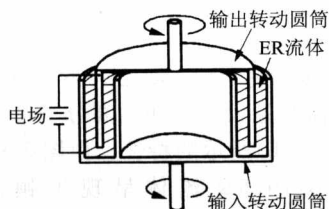


图 2.94 ER 离合器的原理

ER 驱动器具有如下特征:

① 粒子类 ER 流体的响应时间在几毫秒以内,速度相当快。

② 输入圆筒和驱动电机的特性基本不影响输出,输出特性主要且仅仅与输出转动圆筒有关。

③ ER 驱动器能利用表面的摩擦效果,因此其输出转动圆筒轻,甚至可以采用结实的复合材料来减轻质量,获得大的转矩惯量比。

对于人类来讲,虚拟现实及遥控操作中的力觉提示是一个非常重要的课题。还应该注意,助力系统和与人类协作共存的机器人也正在逐渐增加。迄今为止,这种人类直接操作的机器人系统基本上还没有实际应用,在这样的系统中,安全性占有重要的位置。从安全角度看,ER 驱动器具有以下优点^[45,47]。

① 输出部分的最大速度受输入转动圆筒转速的限制,适当地设定后者的转速,可以避免出现加速,使其安全、可靠。

② 另外,当人类手持机器人末端作反驱动 ER 驱动器时,操作十分快速而轻巧。

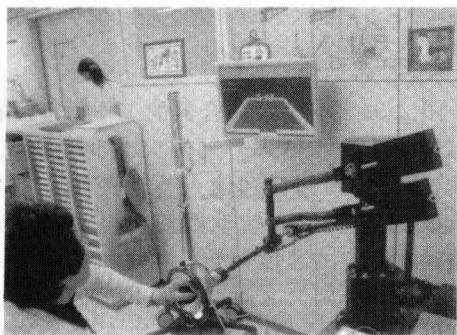


图 2.95 上肢康复训练系统(大阪大学)

③ 驱动器输出部分的惯性小,操作部分的折算惯性也就小,于是可以减小与人类冲突时的碰撞力。

利用以上优点开发了 ER 驱动器三维上肢动作康复训练系统^[45,48],该系统对脑卒中造成的单侧麻痹患者的恢复效果很明显,2005 年已经实现实用化了(图 2.95)。

古庄纯次

2.4.9 高分子驱动器

随着材料和各种技术的发展,像两足步行,以及模仿动物从容行走的机器人都处于开发之中,人工动作正在慢慢地接近自然动作。即使如此,在环境变化的响应性、动作的自如性、材料的无机质性等方面仍然与生物有很大的差距。

人们虽然已经注意利用轻型、耐腐蚀的塑料,或者柔软的橡胶材料,但是仍然对有机高分子材料予以极大的关注。这是因为这种新驱动器材料能敏感地感知环境变化,大幅度地改变形状和特性,呈现出与生物体相似的物理性质和柔软的动作。

高分子驱动器材料包括:利用电介体的电致伸缩效应的屈曲材料,以及由于热、电场、pH、介质交换等作用而膨胀收缩的高分子凝胶。它们被统称为高分子驱动器。

1. 电介质高分子驱动器

一旦给电介质施加电场就会产生变形的现象被称为电致伸缩,如果是强感应体,得到的变形就大。用电子束照射强感应体 P(VDF-TrFE),出现了十分明显的电致伸缩应变效应,因此目前正在研究硅等弹性橡胶的电致伸缩效应的驱动器。

2. 电子导电高分子驱动器

电子导电性高分子在氧化(还原)状态下呈现伸展(收缩)。伴随着氧化(还原)会出现:①阴离子的长消;②分子形态的变化;③静电反应。可以认为这些现象彼此抵消或积累引起伸缩^[49]。在研究成果方面,已经制作了低电压驱动下可以获得大伸缩率和伸缩力的聚苯胺铸膜高分子驱动器。另外,在聚合膜喷镀成形电极上利用电解聚合合法合成聚吡咯制作驱动器,在硅基片上布置参考电极、计数电极,再在作用电极上用电解聚合合法

合成聚吡咯制作 on-chip 驱动器,以及采用聚苯胺纤维制作直线驱动器等的研究都在进行中。

3. 离子导电性高分子驱动器

用非电解电镀法将金或白金结合到离子交换膜的两个面上制成复合膜,向复合膜的两侧施加电场,会发现结合体向正极一侧屈曲的现象,目前正在研究如何把这个结合体元件用于制作软驱动器(图 2.96)^[50]。屈曲在 1.5V 以下的低电压(不会引起水的电解)条件下发生,能重复屈曲 10 亿次以上,其性能相当可靠和耐久。可以认为,这是外加电压产生的电流引起水合作用得到的阳离子在膜中移动(体积流)产生应力的结果(图 2.97)^[51]。众所周知,伴随电流产生体积流的现象就是离子交换膜和荷电凝胶中普遍存在的界面电动现象。

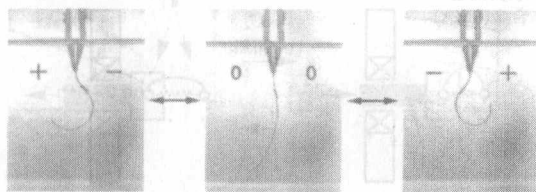


图 2.96 离子导电性高分子驱动器

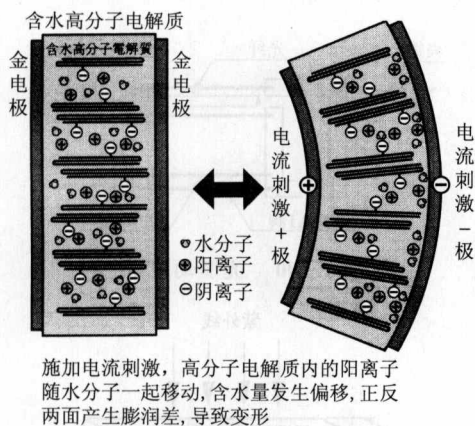


图 2.97 驱动原理图

人们期待着把这种结合体元件的生物作用于医疗和宇宙领域。用化学镀层方法往外径 1mm 以下的管状离子导电性高分子的周围镀金电极,并利用受激准分子激光器沿长轴方向制作绝缘层,这样就做出一个能全方向屈曲的高分子驱动器。目前正在开展把它安装在导管前端,进行脑动脉瘤、脑血栓等脑

血管内手术的应用研究。虽然对结合体元件的屈曲来说,高分子膜的膨润是不可缺少的,但是目前正在 NASA 喷气推进研究所进行的是设法在其周围涂覆防水蒸发层,将它用于宇宙空间行星探测的红外线照相机擦拭的研究。

4. 高分子凝胶驱动器

把负离子膜状高分子凝胶浸入正离子界面活性剂中,向膜的两侧施加电压,界面活性剂分子就向膜表面移动,由于表面电荷的中和及活性剂中疏水基之间的凝聚作用,形成膜状凝胶,它向正极挠曲。如果膜状凝胶上有吊钩,把它悬挂在爪子下面,膜状凝胶就会像蚯蚓一样边活动边向某一方向前进。

丙烯酸与丙烯酸硬脂酸,或者丙烯酸与 16-丙烯酰基烷的共聚合凝胶在温度变化、溶媒变化、pH 变化的条件下会引起可逆秩序-无秩序的转移,呈现形状记忆的功能^[52]。如果用有机溶媒将凝胶膨润成非晶态浮上水面后,(伴随表层的形成与收缩产生的)内、外压差与(溶媒浓度梯度造成的)浸透压力的作用下,它会长时间地持续自发运动。这种对化学环境变化做出响应的性质有可能被用来制作驱动器。

在把高分子凝胶热响应的体积变化取作驱动力的时候,伸缩速度是一个问题。响应时间与凝胶尺寸的平方成比例,因此掌握生成微小凝胶的技术是极其重要的。

让凝胶同时进行微观组织的分离与架桥,这样能制作出直径为 100~200 μm 的多孔结构海绵体状凝胶。此外,在热响应性高分子与赋形性高分子的混合物成形后,再将赋形性高分子进行过滤,也能生成多孔结构,这些都是制作微小且快速伸缩的凝胶的方法^[53]。

热响应性高分子之一的聚乙烯甲基醚(PVME)是一种转换点在 38 $^{\circ}\text{C}$ 附近的各向同性凝胶,将 PVME 多孔制纤维从 20 $^{\circ}\text{C}$ 加温到 40 $^{\circ}\text{C}$,单根纤维产生大约 0.3g 的收缩应力,响应速度很快(<1s)。1000 根纤维束组成的人工肌肉模型能像人的手腕那样拿起 300g 重物。如果在膜状多孔 PVME 凝胶的单面形成非热响应性的凝胶层,那么随温度的变化它会发生挠曲,这就为制作柔软凝胶手指打下

了基础。

高分子驱动器能根据刺激产生可逆伸缩和挠曲,它们质地柔软,动作富有弹性,因此说它们是很有希望接近生物体特性的一种精密和超小型机械。可是在达到这个目标前,需要从多方面进行探讨的课题还相当多,如根据状况实施速度控制的判断力、重复响应性、安全性等。

一条久夫

2.4.10 光学驱动器

光学驱动器(optical actuator)是一种利用光能原理的新驱动器,它的特点是抗电磁噪声干扰强,可以实现非接触能量供给等。为了应对未来光学计算机的应用时代的到来,具有强大信息处理能力的光驱动器系统在实用化方面还有许多研究课题。根据能量转换过程的不同,它可以分为图2.98所示的三种类型。目前,商业化的光学驱动器仍处于基础开发阶段,进入实际应用仍有差距。

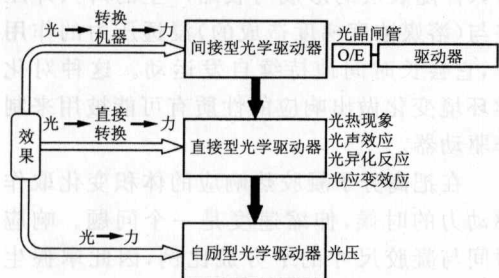


图 2.98 光学驱动器的分类

1. 间接型光学驱动器

间接型光学驱动器借助于光晶闸管等光电功率转换元件把光信号转换为电能,再驱动传统电动驱动器的方法。目前这种驱动形式已经能够简单地实现了,根本的问题是它需要光电转换元件。

2. 直接型光学驱动器

直接型光学驱动器是在内部将光能转换为其他形式的能量,最终输出机械能的一种驱动器。至于能量的转换方式^[64]可以采取各种各样的物理和化学现象,如光热现象(热膨胀、热变形等)、光声效应、光异化反应、光应变效应等。

一般认为,从实用的层面来说,直接型光学驱动器的应用范围最广。图 2.99 给出具

有热变形现象的形状记忆合金(SMA)的光驱动器的结构组成。直接向 SMA 照射激光,加热,停止照射,冷却,就可以向左右方向驱动导杆。图 2.100 所示为利用 SMA 的光驱动夹钳系统^[55]。除此以外,还有基于光热现象的光流体转换元件的事例^[56]。图 2.101 是介绍了一个由光应变效应 PLZT 陶瓷构成的双压电晶片型光学驱动器^[57]。向双压电晶片的上面或下面照射紫外线,它的前端就相应地出现上下位移,人们期望这种光驱动器的应用能达到与 PZT 驱动器现有的水平,但前提是它的响应速度要先得到改善。

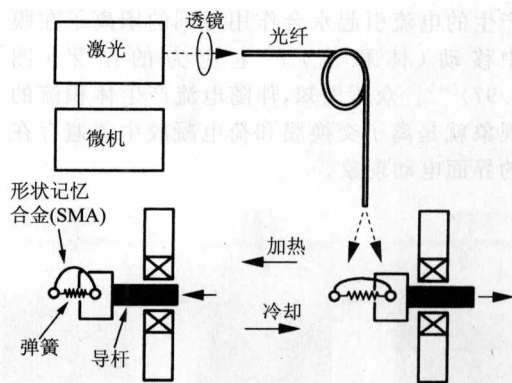


图 2.99 形状记忆合金光学驱动器

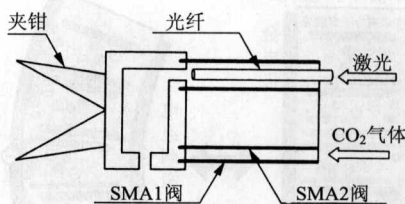


图 2.100 光驱动夹钳

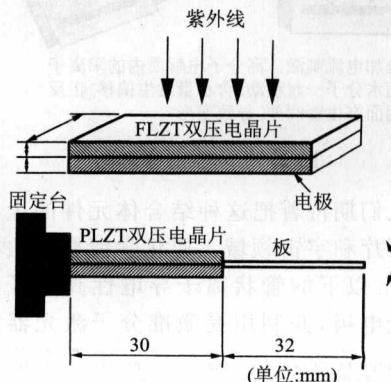


图 2.101 双压电晶片型光学驱动器

3. 自励型光学驱动器

自励型光学驱动器有两种形态:一种是根据等离子体产生激光推进^[58];另一种是光照射物体后产生的放射压力^[59]。后者产生的力相当小,可用于细胞等微小粒子的移动和位置固定。

中田 毅

参考文献

2.1 电动驱动器

- [1] 見城, 菅原: ステッピングモータの基礎とマイコン制御, 第1章, 総合電子出版社 (1994)
- [2] T. Kenjo and A. Sugawara: Stepping Motors and their Microprocessor Controls, Oxford University Press, 2nd ed. (1994)
- [3] 見城尚志: モータのABC, 講談社 (1994)
- [4] 見城, 佐渡友: モータのすべて, 技術評論社 (2001)
- [5] 見城, 永守: 新・ブラシレスモータ, 総合電子出版社 (2000)
- [6] T. Kenjo: Electric Motors and their Controls, Oxford University Press (1991)
- [7] T. Kikuchi and T. Kenjo: Developing an educational simulation program for the PM stepping motor, IEEE Transaction on Education, Vol.45, No.1 (February, 2002) pp.70-78
- [8] H. Asada et al.: Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors, Proc. of 11th ISIR (1981) pp.629-636
- [9] 小野裕ほか: ダイレクト・ドライブ・サーボアクチュエータ "DYNASERV", 横河技報, Vol.31, No.4 (1987) pp.155-160
- [10] R. Welburn et al.: Ultra High Torque Motor System for Direct Robotics, Proc. Of Robot 8 (1984)
- [11] 橋田茂ほか: 平面サーボモータ PLANESERV とその要素技術, 横河技報, Vol.45, No.2 (2001) pp.83-86

2.2 液圧驱动器

- [1] 池辺ほか: サーボ機構とその要素 (第2版), オーム社 (1976)
- [2] 日本油空圧学会編: 新版油空圧便覧, オーム社 (1989)
- [3] 横田ほか: メカトロ油圧技術, 日本機械学会編, 養賢堂 (2001)
- [4] 鈴木, 横田: 旋回流利用による気泡除去 第2報 テーパー形による性能向上, 油圧と空気圧, Vol.25, No.4 (1994) pp.543-548

2.3 气动驱动器

- [1] 日本油空圧学会編: 新版油空圧便覧, オーム社 (1989) p.431, p.487
- [2] 則次俊郎: 空気圧システムの設計と制御, パワーデザイン, Vol.30, No.11 (1992) pp.9-68
- [3] Ismail Altuncu and Toshiro Noritsugu: A learning control application for a pneumatic manipulator on impact motion, Journal of Robotics and

- Mechatronics, Vol.9, No.5 (1997) pp.332-340
 - [4] 則次俊郎: 空気圧アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3 (1997) pp.355-359
 - [5] 則次俊郎: ソフトアクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6 (1999) pp.795-798
 - [6] 佐々木勝美, 山口克也, 岡下由一: 空気圧サーボの実用事例, フルイドパワーシステム, Vol.30, No.3 (1999) pp.218
 - [7] 宮入庄太監修: アクチュエータ実用辞典, フジ・テクノシステム (1988) pp.970-995
 - [8] 則次俊郎: 空気圧制御の新しい展開, システム/制御/情報, Vol.39, No.2 (1995) pp.67-73
 - [9] 則次俊郎: 空気圧系における制御理論の適用, 計測と制御, Vol.35, No.2 (1996) pp.111-115
 - [10] 則次俊郎, 和田力, 矢野坂雅巳: 空気圧サーボ系の適応制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.11 (1988) pp.1187-1194
 - [11] 則次俊郎, 高岩昌弘: 外乱オブザーバを用いた空気式パラレルマニピュレータの位置決め制御, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7 (1997) pp.1089-1096
 - [12] 小山紀, 藤田壽憲, 荒井太四郎: こんなところにも使われている空気圧, フルイドパワーシステム, Vol.32, No.2 (2001) pp.78-84
 - [13] 高岩昌弘: 空気圧サーボの応用事例, フルイドパワーシステム, Vol.32, No.2 (2001) pp.85-89
 - [14] 則次俊郎, 安藤文典, 山中孝司: ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット (第1報 インピーダンス制御による訓練運動モードの実現), 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.1 (1995) pp.141-148
 - [15] 則次俊郎: 空気圧ソフトアクチュエータと人間親和メカニズム, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7 (2003) pp.722-726
- #### 2.4 特殊驱动器
- [1] 内野研二: 圧電アクチュエータ開発・応用の要点, エレクトロニクスエッセンシャルズ, No.3, 日本工業技術センター (1984) p.16
 - [2] S. Takahashi: Multilayer piezoelectric ceramic actuators and their applications, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.24, Suppl.24-2 (1985) pp.41-43
 - [3] K. Nakamura, H. Ando and H. Shimizu: Bending vibrator consisting of a LiNbO₃ plate with a ferroelectric inversion layer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, Suppl.26-2 (1987) pp.198-200
 - [4] T. Iijima, M. Wada, Y. Nakagawa and H. Itoh: Ultrasonic motor using flexural standing wave, Jpn. J. Appl. Phys., 26, Suppl.26-1 (1987) pp.191-193
 - [5] T. Tanaka, Y. Tomikawa, T. Ogasawara, S. Sugawara and M. Kouno: Ultrasonic motors using piezoelectric ceramic multi-mode vibrators, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, Suppl.27-1 (1987) pp.192-194
 - [6] M. Kurosawa and S. Ueha: Hybrid transducer type ultrasonic motor, IEEE Transaction UFFC, Vol.38, No.2 (1991) pp.89-92
 - [7] 伊勢悠紀彦: 超音波モータ, 音響学会誌, Vol.43, No.3 (1987) pp.184-188
 - [8] M. Kurosawa and S. Ueha: Single-phase drive of a circular ultrasonic motor, J. Acoust. Soc. Am., Vol.90 (1991) pp.1723-1728
 - [9] M. Kuribayashi, S. Ueha and E. Mori: Excitation

- conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.77, No.4 (1985) pp.1431-1435
- [10] 飯野朗弘：マイクロ超音波モータの応用，超音波 TECHNO, No.6 (1997) pp.50-55
- [11] 鈴森，前田，渡辺，久田：有限要素法によるファイバレス FMA の最適設計，日本機械学会論文誌 (C)，Vol.63-609 (1997) pp.1610-1615
- [12] 川村，平井：変形を伴うアクチュエータの構造的分類，第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1997) pp.1049-1050
- [13] H. F. Schulte Jr.: The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle, The application of External Power in Prosthetics and Orthotics, National Academy of Sciences-National Research Council (1961) pp.94-115.
- [14] 宇野：ゴム人工筋とロボットへの応用，油圧と空気圧，Vol.17, No.3 (1986) p.175
- [15] 鈴森，堀，宮川，古賀：マイクロロボットののためのアクチュエータ技術，コロナ社 (1998) pp.82-104
- [16] 則次：ソフトアクチュエータ，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.6 (1999) pp.795-798
- [17] 川村，清水，玉井，早川：Hexahedron Rubber Actuator (HRA) の開発，日本ロボット学会誌，Vol.16, No.3 (1999) pp.369-375
- [18] 静電気学会：静電気ハンドブック，オーム社 (1981)
- [19] 鈴森，堀，宮川，古賀：マイクロロボットののためのアクチュエータ技術，コロナ社 (1998) pp.146-150
- [20] 鈴森：静電アクチュエータ，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.3 (1997) pp.342-346
- [21] 新野，樋口，柄川：交流駆動両電極形静電モータ，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.1 (1997) pp.97-102
- [22] 大西敬三：水素吸蔵合金のおはなし，日本規格協会 (1993)
- [23] 大角泰章：水素吸蔵合金—その物性と応用—，アグネ (1999)
- [24] 脇坂裕一：水素吸蔵合金アクチュエータ，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.3 (1997) pp.347-350
- [25] 佐々木忠之，小川孝寿，室正彦，川嶋稔夫，伊福部達：MH アクチュエータの応答速度の改善と制御，国立身体障害者リハビリテーションセンター紀要，Vol.10 (1989) pp.121-126
- [26] 佐々木忠之，川嶋稔夫，青山英樹，伊福部達，小川孝寿：水素吸蔵合金を利用したアクチュエータの開発，日本ロボット学会誌，Vol.7, No.5 (1986) pp.496-500
- [27] 佐藤満，井野秀一，清水俊治，伊福部達，脇坂裕一，泉隆：介助支援アームのためのコンプライアンス可変型水素吸蔵合金アクチュエータシステムの開発，日本機械学会論文誌 (C)，Vol.62, No.597 (1996) pp.1912-1919
- [28] Y. Wakisaka, M. Muro, T. Kabutomori, H. Takeda, S. Shimizu, S. Ino and T. Ifukube: Application of hydrogen absorbing alloys to medical and rehabilitation equipment, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol.5, No.2 (1997) pp.148-157
- [29] 脇坂裕一，室正彦，兜森俊樹，竹田晴信，伊福部達：福祉機器への利用を目的とした大出力水素吸蔵合金 (MH) アクチュエータの応用の検討，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.7 (1997) pp.1060-1067
- [30] 井野秀一，敦賀健志，伊福部達，田中敏明，佐藤満，泉隆，室正彦：水素吸蔵合金アクチュエータを利用した移乗介助支援システムの構築，第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1997) pp.345-346
- [31] T. Tsuruga, S. Ino, T. Ifukube, M. Sato, T. Tanaka, T. Izumi and M. Muro: A basic study for a robotic transfer aid system based on human motion analysis, *Advanced Robotics*, Vol.14, No.7 (2000) pp.579-595
- [32] 奥村与志照，敦賀健志，井野秀一，伊福部達，田中敏明，泉隆，河野博，室正彦：肘関節リハビリテーションシステムのための小型 MH アクチュエータの開発，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.1, No.5 (1999) pp.53-58
- [33] 井野秀一，泉隆，伊福部達：ヒトの感覚特性に基づいたハプティックインタフェースの開発，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.1, No.4 (1999) pp.9-18
- [34] Y. Wakisaka, M. Muro, T. Hamazaki and M. Yasuda: Application of Hydrogen Absorbing Alloy Actuator to Emergency Shutdown Valves, *Proceedings of the 4th Japan-Korea Joint Symposium '97 on Hydrogen Energy* (1997) pp.44-53
- [35] 神山新一：磁性流体入門，産業図書 (1989) pp.121-123
- [36] 神山新一：磁性流体アクチュエータ，日本ロボット学会誌，Vol.1, No.2 (1984) pp.1-9
- [37] 神山新一ほか：磁性流体を利用したアクチュエータの基本特性，日本機械学会論文誌 (B)，Vol.59, No.567 (1991) pp.3493-3497
- [38] R. Martin et al.: Membrane Pump with Electrical Mechanical Transducer, U.K. Patent 213325 A (1982)
- [39] R. E. Rosensweig: Fluid dynamics and sciences of magnetic liquids, *Advances in Electronics and Electron Phys.*, Vol.48 (1979) pp.103-195
- [40] W. M. Winslow: Induced fibrillation of suspensions, *J. of Applied Physics*, Vol.20 (1949) pp.1137-1140
- [41] 小山編：電気特性 (ER) 流体の開発，シーエムシー (1994)
- [42] メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科会成果報告書 (P-SC 237, 主査：古荘純次)，日本機械学会 (1996)
- [43] R. Tao (ed.): *Proc. of the 7th Int. Conf. On Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*, World Scientific (1999)
- [44] 古荘：ER 流体を用いたメカトロニクス機器の制御 (展望)，計測と制御，Vol.30, No.9 (1995) pp.687-691
- [45] 古荘：ER 流体を用いたメカトロニクスシステム (解説)，フルイドパワーシステム，Vol.32, No.6 (2001) pp.390-395
- [46] A. Inoue, S. Maniwa, Y. Ide and H. Oda: Electro rheological effect of liquid crystal-line polymers, *Int. J. of Modern Physics B*, Vol.10, Nos.23&24 (1996) pp.3191-3200

- [47] 古荘, 魏, 古賀: ER 流体を用いた低慣性アクチュエータの開発とそのパーチャルリアリティへの応用, 日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集 (IV) (1995) pp.265-266
- [48] 古荘, 小柳, 笠, 井上: NEDO プロジェクト「身体機能リハビリ支援システム」での上肢動作訓練支援システムの開発 (第2報), 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集 (2002) 3 L 31
- [49] 金藤敬一ほか: 有機合成高分子で人工筋肉を造る, 応用物理, Vol.65 (1996) pp.803-810
- [50] 安積欣志: 高分子アクチュエータ材料, 高分子, Vol.50 (2001) pp.450-453
- [51] A. Asaka and K. Oguro: Bending of polyelectrolyte membrane platinum composites by electric stimuli Part II. Response Kinetics, J. Electroanal. Chem., Vol.480 (2000) pp.186-198
- [52] Y. Osada and A. Matsuda: Shape memory in hydrogels, Nature, Vol.376 (1995) p.219
- [53] H. Ichijo and R. Kishi: Thermo-Responsive Polymer Gels Macromolecular Science and Engineering (ed. Y. Tanabe), Springer (1998) pp.71-83
- [54] 高森年: アクチュエータ革命, 工業調査会 (1987)
- [55] 清水義之ほか: 光駆動能動鉛子システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99 講演論文集 (1999) 1 P 2-10-014
- [56] 赤木徹也: 光-空気圧サーボシステムに関する研究, 岡山理科大学博士論文 (1998)
- [57] 森川泰ほか: PLZT 素子を用いたバイモルフ型光アクチュエータ (第1報, オン・オフ制御による光アクチュエータの変位制御), 日本機械学会論文集 (C), Vol.63, No.612 (1997) p.2714
- [58] 五味光男ほか: レーザによる小舟模型の推進実験, 日本機械学会論文集 (B), Vol.58, No.551 (1992) p.262
- [59] 国府田隆夫ほか: 光物性測定技術, 東京大学出版会 (1986) p.3



図 1.1 圧電素子



図 1.2 大電流駆動回路 (a)



図 1.3 小電流駆動回路 (b)



図 1.4 大電流駆動回路 (a)



図 1.5 大電流駆動回路 (b)

図 1.6 圧電素子駆動回路 (a)

(a) 圧電素子駆動回路 (a) 圧電素子駆動回路 (a)

大電流駆動回路 (a) 大電流駆動回路 (a)

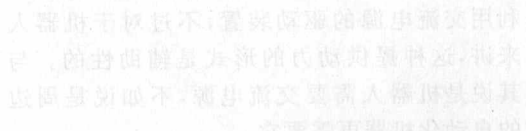


図 1.7 圧電素子



図 1.8 大電流駆動回路 (a)



図 1.9 小電流駆動回路 (b)



図 1.10 大電流駆動回路 (a)

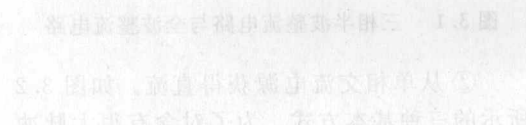


図 1.11 大電流駆動回路 (b)

図 1.12 圧電素子駆動回路 (a)

(a) 圧電素子駆動回路 (a) 圧電素子駆動回路 (a)

大電流駆動回路 (a) 大電流駆動回路 (a)

第3章 动力源

3.1 固定式机器人的动力源

3.1.1 电动机器人

电动机器人的驱动装置有步进电机、DC电机、AC伺服电机(无刷电机)、超声波电机等。辅助动力源有电磁阀。这些驱动装置基本上都从直流电源得到动力,当然也有直接利用交流电源的驱动装置,不过对于机器人来讲,这种提供动力的形式是辅助性的。与其说是机器人需要交流电源,不如说是周边的自动化机器更需要它。

固定式机器人所需的直流基本上都是从交流电源转换而来的,很少采用电池。电源的分类如下。

① 从三相交流电源得到直流。大多采用变压器和整流二极管,基本有如图 3.1 所示的两种方式。变压器可以把电压调整为合适的电压值,同时起到将交流电源与直流一侧的基准点(叫做 GND)绝缘的作用。

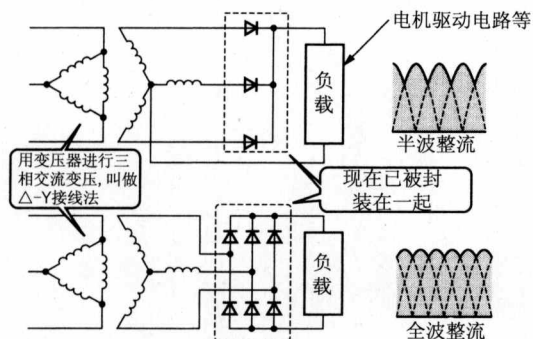


图 3.1 三相半波整流电路与全波整流电路

② 从单相交流电源获得直流。如图 3.2 所示的三种基本方式。为了对含有很大大脉动成分的直流进行平滑化,通常采用图 3.3 所示的电容器或扼流圈。

③ 把直流转换为直流。交流电压的变换是通过变压器初级线圈和次级线圈的匝数比来实现的。直流电源的变换则可以使用晶体

管或 MOSFET,其基本电路如图 3.4 所示。

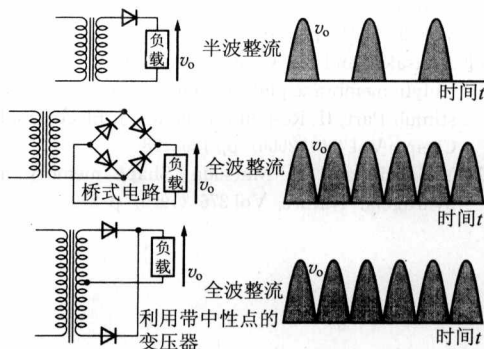
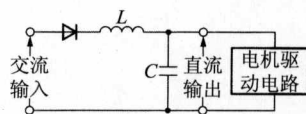
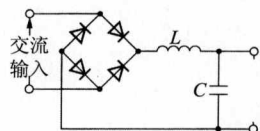


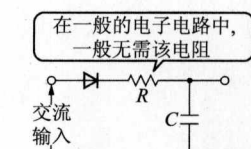
图 3.2 单相整流电路



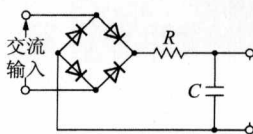
(a) 半波整流,需要大的 L, C



(b) 全波整流,可取小的 L, C



(c) 简单,但热损失和脉动大



(d) 简单且脉动小

图 3.3 利用电容和扼流圈进行平滑

④ 把电压转换为电流。电机的转矩(旋动力)取决于电流。于是,电机的控制电路大

多被设计为电流控制方式。有时在初步实验阶段也希望实施电流控制,此时可见如图 3.5 所示的电压-电流变换电路。

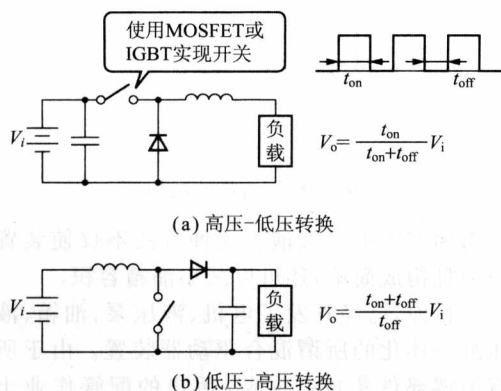


图 3.4 DC 转换器

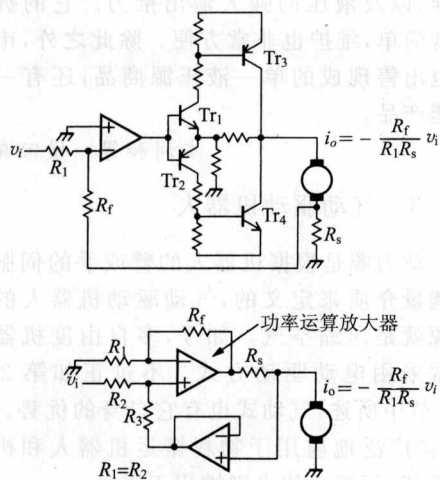


图 3.5 电压-电流变换电路

⑤ AC 伺服电机的场合。为了由直流电源产生三相交流,通常使用晶体管(或 MOSFET)与二极管构成的逆变器(参阅第 2 篇 2.1.3 节图 2.20)。

见城尚志

3.1.2 液压驱动机器人

液压驱动(hydraulically driven)机器人具有电液伺服机构(electro-hydraulic servo mechanism)的特征,即具有高精度和快速响应的特性,因此在初期的高性能机器人中占居主要的位置。随着 DC 伺服机构的普及,它逐渐让位于电动机器人,不过由于它具有防爆性,它在喷涂机器人中仍然占有一席之地,

直到 AC 伺服电机的出现,它将要面临最终被电动机器人淘汰的趋势。主要原因来自两个方面:一方面是工作油液的维护相当麻烦;另一方面是不能完全保证驱动装置输出轴或配管的油液泄漏问题。因此,今后液压驱动比较适用的领域可能就剩下建设机器人,超重物体搬运或者需要大功率输出的作业了。下面就液压驱动机器人的动力源——液压源的基本组成和元器件进行说明。

1. 液压源的基本组成

图 3.6 示出了伺服液压源的基本组成。系统的元器件有液压泵、过滤器、压力控制阀、蓄能器、冷却器、加热器、液压缸等。

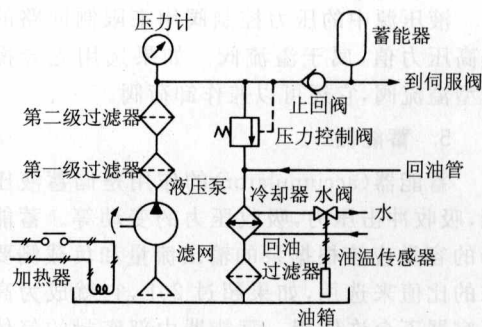


图 3.6 伺服液压源回路举例

2. 液压泵

液压泵粗略地分为定量泵和可变容量泵两种。典型的定量泵是齿轮泵和叶片泵,其优点是强度好,易维护。但是,为了不受负载的影响,始终保持定流量输出,以及节省能量,需要有卸荷回路。图 3.7 给出卸荷回路的典型例子。它的原理是检测蓄能器中的内压,一旦超过了一定的压力,卸荷阀就把泵产生的流量放回油箱。

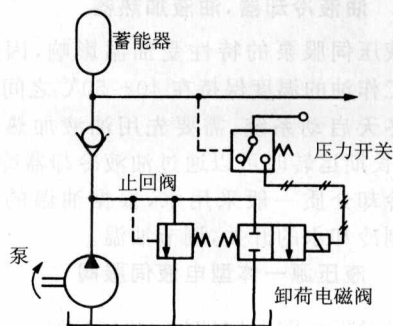


图 3.7 卸荷回路的举例

可变容量泵常使用斜板式或斜轴式轴向活塞泵。当它用于伺服液压源时,可以采用压力截止控制,即一旦输出的压力超过了一定的值,就自动地减少输出流量。

3. 过滤器

用于液压驱动机器人控制的电液伺服阀属于精密元件,如果工作油中含有杂质会引起故障。因此,需要仔细考虑工作油的过滤问题。在液压泵的吸入端,可设置网眼直径为 $100\mu\text{m}$ 左右的网状过滤器来保护液压泵,在输出端则大多设置 $25\mu\text{m}$ 级的一级过滤器和 $3\sim 10\mu\text{m}$ 的二级过滤器。

4. 压力控制阀

液压源中的压力控制阀用来限制回路的最高压力值,属于溢流阀。如果选用先导操作型溢流阀,它还可以兼作卸荷阀。

5. 蓄能器

蓄能器(accumulator)的作用是储蓄液压能,吸收冲击压力,吸收压力的变动等。蓄能器的容量应该根据泵的输出流量和负载侧要求的比值来选用,如果超过 20L ,它就成为高压容器不允许使用。蓄能器内部密封的气体的压力应该为额定压力的 $60\%\sim 70\%$,而且必须至少低于最高工作压力的 20% 。

6. 油箱

油箱除了储存油液以外,也起到散热器的作用。油箱应该有足够的容量,大体选取液压泵每分钟输出流量的 $3\sim 5$ 倍(对应于输出量 $30\text{L}/\text{min}$,油箱容量为 $100\sim 150\text{L}$)。如果油箱的容量过小,难以消除回油所产生的气泡,如果气泡被吸入泵里,会造成气穴现象。

图 3.8 示出了典型的油箱结构。

7. 油液冷却器,油液加热器

液压伺服泵的特性受油温影响,因此希望将工作油的温度保持在 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 之间。如果在冬天启动系统,需要先用油液加热器加热,而长期运转时可以通过油液冷却器冷却。

冷却介质一般采用水,根据油温的检测值控制冷却水的开关,调节油温。

8. 液压源一体型电液伺服阀

有效地去除因回油混入的气泡以及在阀的部位因空泡混入的气泡的方法已经被提出且实现了商品化,其原理是产生旋转流,制造

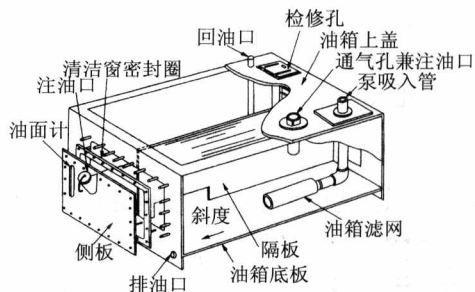


图 3.8 油箱的结构

压力梯度以消除气泡。这种方法不仅使装置小型且构成简单,还可以减小油箱容积。

目前,已经开发了电机、液压泵、油箱、液压缸一体化的所谓混合驱动器装置。由于所有的零部件集成在一起,用户的配管作业十分简单,能够体验到由厂家安装电机的专业水准,以及液压的强大输出推力。它的拆卸非常简单,维护也非常方便。除此之外,市场上也出售现成的单一液压源商品,还有一些节能产品。

本间和男 横田真一

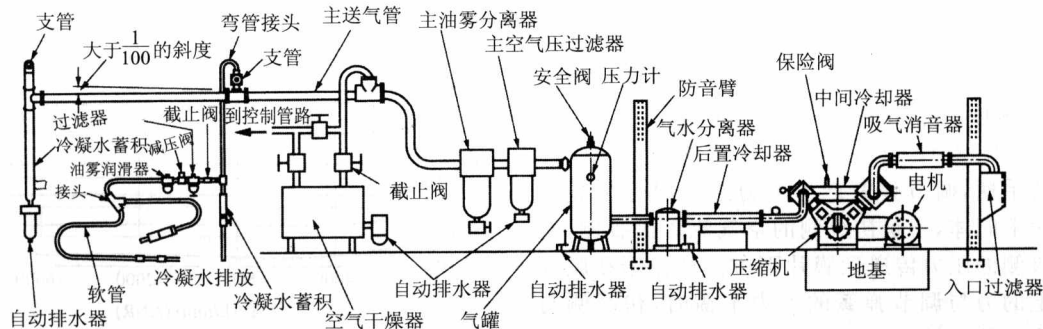
3.1.3 气动驱动机器人

动力源是根据机器人的臂或手的伺服器的能量介质来定义的,气动驱动机器人的动力源就是压缩空气。如今,多自由度机器人通常采用电动驱动方式。不过正如第2篇2.3节中所述,气动式也有它自身的优势。例如,被广泛地应用于物料搬运机器人和机器人手部,而真空技术则被用于吸盘。

产生气动源的机械装置有空气压缩机、鼓风机、真空泵等。通常,产生压力大于 100kPa 的装置属于空气压缩机,而排气压力小于 100kPa 的则属于鼓风机。在鼓风机里也可以分为鼓风机(blower)($10\sim 100\text{kPa}$)和风扇(fan)(10kPa 以下)。真空泵产生比大气压低的负压。通常,工业机器人使用的气动源大多为空气压缩机。下面将介绍空气压缩机气动源的组成和主要的元器件。

1. 气动源的组成

工厂中用于工业机器人的压缩空气大多数是从集中气动源经由管路送出。图 3.9 是日本流体动力工业会制定的配管管理流程。气动源从空气压缩机开始,再由后续冷却器、气水分离器、气罐、空气过滤器、油雾分离器、

图 3.9 工厂中空气配管的流程^[3]

空气干燥器等各种元器件构成。在管路的末端,再经过由过滤器、减压阀和油雾润滑器组成的空气质量调节组件后,送到各个伺服器控制阀。空气质量调节组件的作用是提供规定压力的清净空气。近年来,气动驱动系统的元器件有免润滑(不给油)的趋势,因此在大多数场合都可以省略油雾润滑器。

在空气管路中,由于绝热膨胀的缘故在空气中凝聚了一定的水分(冷凝水),不应该让冷凝水流入各个元器件中。因此,可以如图 3.9 所示,敷设管路时朝末端方向做出 1/100 的斜度,在各处再设置一些自动排水器(冷凝水排出器)。另外,压缩机运转的噪声及功率损耗的问题也应该列入考虑之中。

2. 空气压缩机

空气压缩机的分类如图 3.10 所示。涡轮型的压缩机利用高速旋转的叶片使通过其间的空气产生动能,导致压力上升。根据空气的流动方向,空气压缩机又可以分为离心式和轴流式。

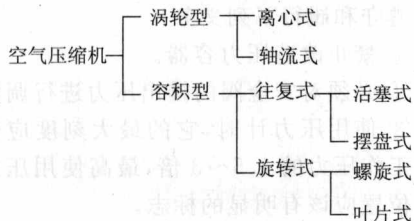
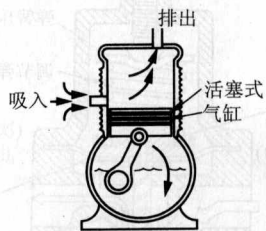


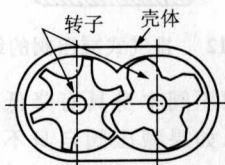
图 3.10 空气压缩机的分类

容积型又可以分为往复式(recipro)和旋转式(rotatory)。往复式又可以细分为活塞式和摆盘式,旋转式可以细分为螺旋式和叶片式。图 3.11 示出典型的空气压缩机的结构。往复式是通过气缸中活塞的往复运动,重复完成吸入、压缩和排出的动作。螺杆式与叶

片式是让特制的螺杆或叶片在压缩机的壳体内旋转,通过壳体和转子所包围的压力室的体积变化完成吸入、压缩、排出过程。典型的旋转式压缩机是螺旋式压缩机和涡旋式压缩机。与往复式压缩机相比,旋转式压缩机的噪声和振动均较小。



(a) 往复式



(b) 螺杆式



(c) 叶片式

图 3.11 空气压缩机的基本结构

空气压缩机正在向免润滑(无油化)的方向发展,通过引入逆变器控制,空气压缩机可以进一步减小压力脉动,节约能量,有望成为机器人的一种有效的动力源。

3. 减压阀

通常,空气压缩机排出的压力是一定的,

所以对应于不同使用目的需要对空气压缩机排出的空气进行减压。起到这种作用的阀称为减压阀(regulator)。它是构成正确的驱动回路不可缺少的空气压缩元器件。

图 3.12 示出排气式减压阀的结构。旋转手柄,调节弹簧产生的力经过膜片和导柱压下阀体,于是初级侧的空气流入次级侧,次级侧的压力传递到膜片下方。当作用在膜片上的力与调节弹簧的弹力平衡时,初级侧与次级侧就被截止,次级侧根据调节弹簧的弹力维持设定的压力。如果次级侧的压力下降,初级侧和次级侧再次连通。如果次级侧的压力比设定压力高,那么初级侧和次级侧将被阻隔,排气阀的阀座与导柱分离,次级侧的压缩空气从排气阀孔向外排放。

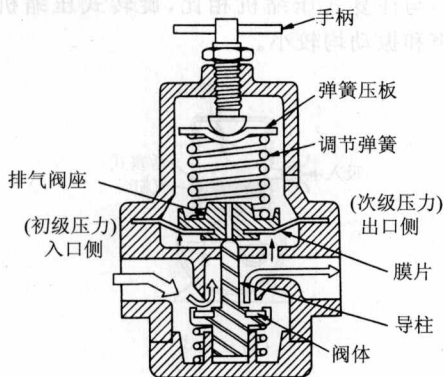


图 3.12 排气式减压阀的结构

排气式减压阀本身具有降低次级侧压力的功能;反之,如果减压阀自身不具有排气功能,就无法进行排气,其结果是只要次级侧的空气不消耗光,次级侧的压力就不会下降。放泄式减压阀时常从排气阀的阀座处释放出微量空气,这就使减压阀的调整变得很容易。

减压阀的性能有如图 3.13 所示的流量特性和如图 3.14 所示的压力特性。流量特性表示在不流动状态下设定的次级侧压力随流量的增加而降低的情形。特性曲线被截断的右端表示允许最大流量。高性能减压阀的特性应该呈现出随着流量的增加,压力的下降越来越小。图 3.14 表示初级侧压力对次级侧压力的影响。这些特性被记录在厂家的产品目录中。根据这些特性就能挑选出满足使用条件的减压阀。另外,在减压阀后面设置一个气罐,对于降低流量变化造成的次级

侧压力变动能起到很好的作用。

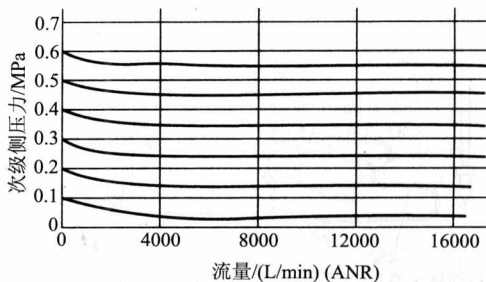


图 3.13 减压阀的流量特性^[4]

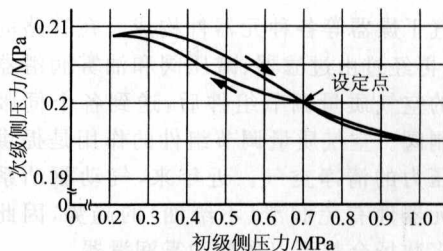


图 3.14 减压阀的压力特性^[4]

由空气压缩机与减压阀构成了气动源的最小系统。反之,如果打算改善空气的质量,提高气路的安全性,那么就应该按照如图 3.9 所示附加一些必要的元器件。

若空气的压力高于 0.2MPa (2kgf/cm^2),容量大于 40L ,或者容器的内径大于 200mm 且容器高度超过 1000mm 时,那么根据劳动安全卫生法的有关条款,它们应该视为“第二种压力容器”。使用这样的容器时,必须按照第二种压力容器的详细说明书、使用说明书等来进行操作和维护。

对于安装和使用这样的压力容器,必须严格遵守和履行下列义务:

- ① 禁止改造压力容器。
- ② 必须对安全阀的排出压力进行调整。
- ③ 使用压力计时,它的最大刻度应该为最高工作压力的 $1.5\sim 3$ 倍,最高使用压力的对应位置应该有明显的标志。
- ④ 每年至少做一次定期检查,检查的内容包括容器内外表面的清扫,本身有无损伤的检查,安装盖的螺栓是否有磨损,管路及阀(截止阀、安全阀)有无损伤等。

⑤ 压力容器发生破损事故后,向所属劳动基准监督署提交第二种压力容器事故报告书。

则次俊郎

3.2 移动式机器人的动力源

讨论移动式机器人的动力源时,有必要按照它的用途、形态(大小)来进行分类。如果是属于在车间内或确定的作业区域内边移动边作业的机械手,那么通常采用电缆供电的 AC 电源或 DC 电源。不过,即使作业区域与上述的相同,AGV 或自动搬运车等移动式机器人却主要选用电池来提供动力源。室外作业机器人使用电池驱动,建筑机械或土木作业机器人则以汽油发动机或柴油发动机作为直接的动力源。这时先用发动机驱动发电机,然后再将获得的电能驱动电机或液压泵工作,这样就可以实现液压驱动或电动驱动了。最近,人们也开始关注将微波作为机器人的动力源,表 3.1 给出了它们的分类和用途。

表 3.1 移动式机器人的动力源

机器人的形态	应用范围	直接驱动源	动力源
移动机械手	车间内	电机·液压	电源电缆
自动搬运机器人	车间内	电机	电源电缆
建设机器人	室外	液压	发动机
救助机器人	室内、外	电机·液 气压	电池
小型移动式机器人	室内	电机 气缸	电池 气罐
微型机器人	特定区域	特殊驱动器	微波
拟人机器人	一般	电机	电池

3.2.1 电缆方式^[14]

机器人在限定的范围内移动时,经由电缆就可以实现驱动。车间内移动式机器人的供电方式可以分为直接使用电缆的直接方式和通过滑动触头与带电电缆接触的滑线方式。

在直接方式中,需要设计合适的机构以防止电缆卷入机器人本体或手臂中,或者相互缠绕,或者由于拉力过大引起损坏。

1. 电缆供电方式^[1]

电缆供电方式是用于大型移动机构的一种电缆供电方式,机器人的驱动源需要强大的功率,电缆的直径粗且根数多,控制信号的根数也比较多。在拖链中,电缆互相平行,按 10~50cm 的宽度单层或多层排列,固定在如图 3.15 所示的可弯曲固定架中。

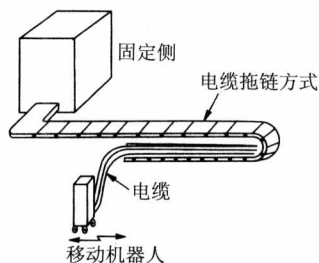


图 3.15 电缆拖链方式的原理图

2. 帘幕方式^[2]

帘幕方式对单轨式机器人的动力供给和信号传输是很有效的。电缆很轻,把它们捆扎成一捆复合电缆,其长度应该比机器人最大行程略长,多余的部分像帘幕一样悬垂下来。

3. 滑环方式^[3]

滑环方式是以车轮或腿移动的机器人最有效的供电方式,此时需要在机器人上搭载一个机构对电缆反复缠卷和释放。这是将电缆缠卷在滚筒上,为了提供电源和传送信号,利用直流电机的电刷电气连接固定侧和旋转侧。

这个方式适合环境条件较好的地方。对于高湿度或多灰尘的环境需要加以特殊的保护,对噪声则应该有相应的对策。

4. 电缆释放方式^[4,5]

电缆释放方式是一种对单轨方式、轮式、腿式等移动式机器人均十分有效的供电手段,由跟随机器人移动的单轨式牵引车(带电缆缠卷机构)、电缆存储装置组成。其中有一种“八”字形储线机构,其侧视图如图 3.16 所示。在这个机构中,电缆靠自重下落,在单方向转过 360°则产生排斥力,再转 360°,该装置的侧视图如图 3.16 所示。

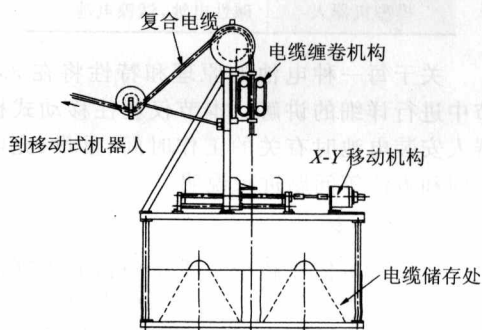


图 3.16 “八”字形储线机构

电缆牵引车是一台牵引电缆,与移动式机器人同步移动,并在单轨上行走的装置。电缆牵引车的结构如图 3.17 所示。电缆牵引车与移动式机器人的同步控制通过检测各个位置的电磁式或光学式位置传感器来实现。

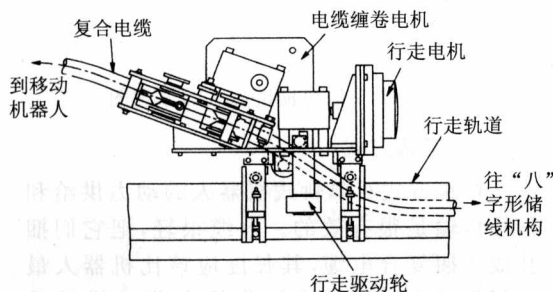


图 3.17 电缆牵引车

3.2.2 电池供电方式

电池可以说是移动式机器人中最常用的动力源。在本节就介绍什么样的电池适合安装在何种机器人上。特别要针对研究用的小型机器人、自主智能机器人中电池的使用方法和充电方法进行说明。

1. 电池的选择

将电池作为移动式机器人的动力源,既省去了从机器人引出电缆线,又不必在地面上设置供电装置,有利于避免原来机器人移动路径简单,动作范围受限等诸多不便之处。表 3.2 列出从自动搬运车到宠物机器人等移动式机器人所使用的各种电池,以及相应的供电、充电条件。

表 3.2 电池的选择

一般搬运车等	铅蓄电池,镍镉电池
小型机器人	镍酸电池,锂离子电池
模型机器人	碱性电池,锰镍电池

关于每一种电池的原理和特性将在 3.3 节中进行详细的讲解。本节仅就移动式机器人安装电池时有关的工作时间、重量、充电时间和方法等问题进行说明。

2. 效率

机器人本体在整个总重量中占有不能忽略的容积与重量。在机器人上使用电池固然带来了省去电缆这一大优点,其代价是移动电池本身也需要能量。对 $30\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 重量

效率(电池单位质量的放电性能)的电池来说,所适合的机器人的重量、消耗功率、效率的数据列于表 3.3 中。例 1 表示为了减少充电次数而搭载了大容量蓄电池,例 2 比例 1 多 5 倍的充电次数,属于搭载小容量电池的情形。例 2 比例 1 在行走时消耗的能量降低了 10%。由此可见,应该根据机器人工作的系统要求,在仔细权衡一次充电后的工作时间与能量消耗的基础上,选择合适的电池容量。

在小型移动式机器人中,从电压、电流的不同,噪声和电源波动等问题,以及控制芯片的稳定性等观点来考虑,最好把控制用电池和电机用电池分开。

表 3.3 机器人的质量与电池的质量·容量^[14]

	移动式机器人 的总质量	平均消耗功率	一次充电 工作时间	电池容量	电池质量	行走 2.6km/h 的所需功率
单位	kg	W	h	$\text{W} \cdot \text{h}$	kg	W
例 1	250	300	5	1500	50	50
例 2	210	292	1	300	10	45

3. 电池的充电

使用蓄电池经常遇到的一个问题是充电。机器人电池充电有如下几种方法:

(1) 更换电池或手动充电 电池剩余电量如果低于某一个值,用户要么更换电池,要么停止作业对其进行充电。护理机器人、娱乐机器人、室外作业机器人等基本上都采用这种方法。这就需要机器人具有检查电池残余量和显示的功能。例如,个人机器人,它能在房间地板上任意来回行走。如果其内部的锂离子电池电量少了,它就会发出“肚子饿啦”的喊声。如果主人把电源线插入电源插座,就可以开始充电^[6]。

(2) 自动充电 这种方法就是在电池容量减少后,机器人自动寻找到充电站,停泊在固定的位置上进行充电。有时也可以在作业的一个循环途中,按照预先编制好的程序,让机器人暂时在充电站耽搁一会儿,连接端子进行充电。例如,保安机器人,它用来防范和防灾,能够检测人体和火灾灾情。它能够按照记忆的地图自主行走,定时地前往充电装置入站自动对接充电^[7]。

(3) 非接触充电法 让移动式机器人在充电站滞留,将充电触点成功对接,在技术上是

有一定难度的,如在定位精度、触点构造等方面,尤其对于小型机器人来说更是如此。这种方法还存在其他问题,如噪声从本体触点混入,触点生锈引起接触不良等。于是,可以改成电磁感应的非接触充电方法。

图 3.18 所示的原理是给输电线圈 T_1 施加交流电压 E ,由于交链磁通的作用,在接收线圈 T_2 中产生感应电能,经过负载 R_L 得到它。这里的重要问题是如何减少未能穿过接收线圈的无效磁通的成分。为此,在设计时需要采取各种措施减小线圈之间的距离,选择合适的线圈形状和铁芯材料等。图 3.19 是从商用电源到蓄电池之间的电路组成^[8]。

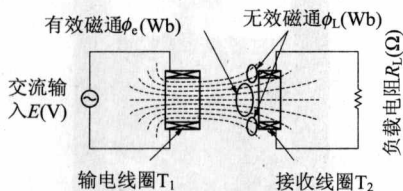


图 3.18 非接触充电原理^[8]

3.2.3 微波(电磁能)供电方式

电池的电能与体积成比例,所以小型化与使用的时间是矛盾的。如果改成有缆供电,那么电缆的重量或刚性又会妨碍机器人的动作。特别是对于微型机器人来说,十分需要无线供给能量的方式。其中的一种方法就是利用 GHz 带宽的微波提供能量,这种方法是从宇宙太阳能向地球传送能量的研究中得到启发的。虽然目前宇宙能的传送尚未实用化,但是在向模型飞机或小型机器人的能量传送方面却取得了一些进展。

例如,通过电磁波向发电系统管道内实施维护作业的微型机器人提供能量^[9]。在这个系统中,选择 14.0~14.5GHz 的微波向直径为 15mm 的管道内的移动-旋转微型机器人

传送能量。图 3.20 给出了管道内微型机器人的能量输送系统^[9]。

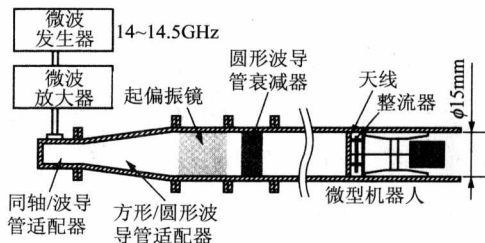


图 3.20 微波能量传送系统^[9]

由上述可知,利用微波向封闭的空间传送能量是有效的,但是如果换成开放空间,就存在效率方面的问题。

3.2.4 发动机供电方式

移动式机器人使用发动机作为驱动源的方法又分为直接把发动机作为动力和由发动机驱动发电机产生电能,再利用电机及液压机械驱动两种方式。

1. 发动机直接驱动

大型建筑和土木施工机械、自主汽车、模型飞机等通常都使用柴油、汽油或特殊燃料发动机。与电机相比较,发动机的功率质量比要高出数十倍;与电池相比,它所依赖的石油燃料有非常优秀的能量密度(能源单位质量或单位体积所储存的能量),而且具有每一次补给能量之后工作的时间和距离很长的特点,它非常适合充当单体移动机械的动力源。

利用发动机驱动的机器人的例子可以举出四足步行机器人^[10]。但是,如果机器人的自由度较多,像多足机器人那样,就会产生由单个发动机如何驱动和控制多轴的问题。这时,关节驱动机构可以采用能自由控制转矩传动的粉末离合器,图 3.21 给出了发动机与一条腿的驱动关系。

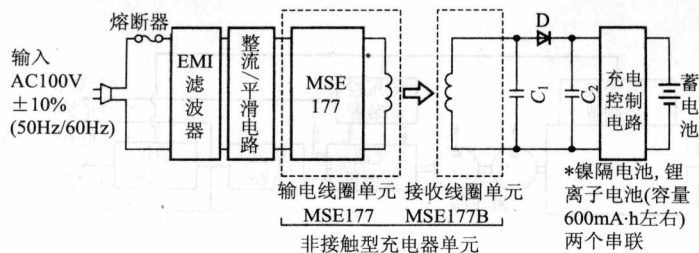


图 3.19 非接触充电器的电路构成举例^[8]

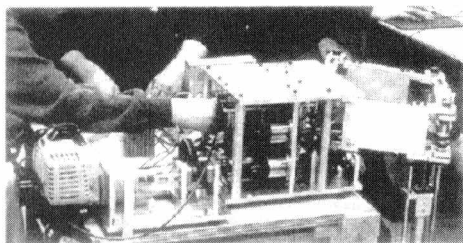


图 3.21 发动机直接驱动的机器人(东海大学)

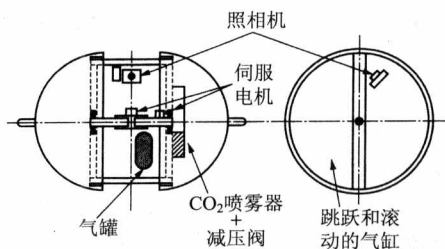
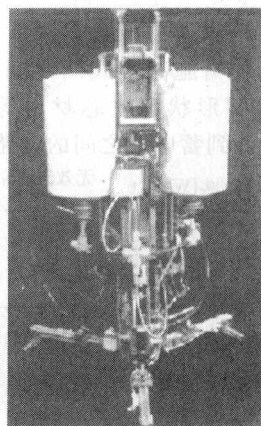
2. 发动机间接驱动

在一般环境下移动的机器人,多数采用发动机驱动发电机或驱动液压泵,再使电动机或液压机器人动作的模式。例如,在消防系统中,专业电源车既作为照明电源,又向灭火机器人或救助机器人的动力源提供电力。这时,机器人随着电源车一起移动,它经由电缆从电源车得到电力供应。

建设机器人或土木作业机器人等大型移动式机器人,它们的机械手就相当于液压驱动的机器人,其动力源的组成如图 3.22 所示。

3.2.5 气动动力源方式

将空气压作为机器人动力源的方法有两种:一种是关节驱动采用气缸或橡胶驱动器;另一种是跳跃机器人或行走机器人等的驱动方法。前者通常使用压缩机供给压缩空气。但是压缩机的个头都不小,移动很笨重,所以目前正在开发用于铠装机器人的小型压缩机^[11]。后者在移动式机器人中设置气罐储存空气。图 3.23 给出了一个利用气压的跳跃机器人简图,它的气源是一个装有 60atm 的 CO₂ 喷雾器,通过减压阀调整压力后驱动气缸进行动作。要想提高机器人跳跃的高度可以使用冲击气罐^[12]。还研发了类似结构的外部环境适应型跳跃机器人,在外部安装了三个铝制气罐(8atm 左右)作为气源。图 3.24 是它的外观^[13]。

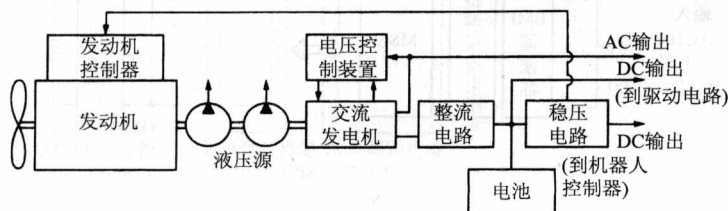
图 3.23 跳跃机器人的组成^[12]图 3.24 使用气罐的跳跃机器人^[13](东海大学)

空气罐方法的问题是气罐的容量有限,所以驱动次数也有限。因此,它比较适合间歇运动的移动式机器人,至于向气罐输送空气的方法与电池充电是同样重要的问题。

增田良介

3.3 电 池

本节对机器人电源所使用的电池进行介绍。图 3.25 给出了电池的分类,它们可以分为化学电池、物理电池、生物电池等。其中,本节介绍化学电池中的一次电池、二次电池(蓄电池)、燃料电池,至于物理电池则涉及太阳能电池。化学电池的原理从1800年的伏特电池开始经历了漫长的历史发展时期,直

图 3.22 发动机方式动力源的基本组成^[14]

至今日。太阳能电池的原理则始于1839年E. Veckre发现的湿式电池,现代太阳能电池则基于1954年Pianson等对pn结半导体的发明。

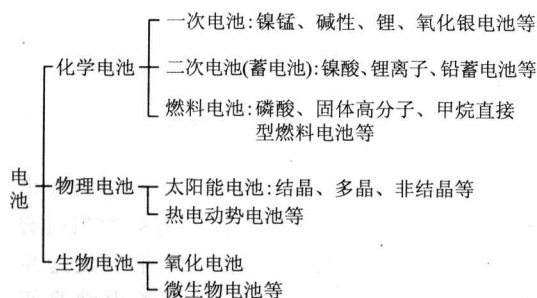


图 3.25 电池分类

电池作为机器人电源使用时,根据用途的不同会互有差异,不过一般都希望能满足体积小,质量轻,能量密度大的要求。下面对几种电池给予详细的介绍。

3.3.1 化学电池

化学电池分类如下:一种化学电池本身内部包含产生电气的活性物质,如一次电池(电化学反应不可逆)和二次电池(电化学反应可逆);另一种化学电池需要从外部供给活性物质,如燃料电池。

1. 电池的原理

不同金属在电解质(液)中所表现出的离子化倾向程度是有顺序差别的。将不同金属放在电解质(液)中,它们之间(电极)会产生电动势。这时,离子化趋势大的金属表现为负极(阴极),相对的极就是正极(阳极)。理论上虽然应该把离子化趋势大的金属作为负极活性物质,不过为了增大电动势,大多数情况下正极活性物质都选用金属氧化物。电极由这些活性物质和聚集电荷的集电体组成。为了促进电极反应,反应面积应该足够大,它们最好是由微细化粒子组成的活性物质。就像平衡科学的理论阐述那样,为了保持电化学反应的平衡,在活性物质中还需要注入各种添加物,以防止退化、延长寿命等。

二次电池以持有何种程度的电荷量作为额定规格,一般用确定的放电时间(例如,5h等)内的公称容量 $A \cdot h$ 来表示。这样一来基准放电电流也就确定了下来。不过,近年来为了与传统发电装置有可比性,大电量输出

的二次电池多数改成用 kW 来表示额定输出。与之对应的,同时也用 $kW \cdot h$ 单位表示电量。

2. 电化学反应直接发电的效率

电化学反应发电装置属于在反应中把物质的化学能直接转化为电能的装置。

从热力学的意义上看,假设 ΔH 为焓的变化, ΔG 为吉布斯自由能量变化, ΔS 为熵的变化, T 为绝对温度,则下式成立:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (3.1)$$

式中, ΔG 用下式表示,于是可以计算出电动势 E ; n 为表示 1 mol 反应中产生的电子个数; F 为法拉第常量 ($9.65 \times 10^4 C/mol$)。

$$\Delta G = -nFE \quad (3.2)$$

理论效率由下式给出:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \cdot \frac{\Delta S}{\Delta H} \quad (3.3)$$

从式(3.3)可以看到, ΔH 是化学能的变化,其中 ΔG 是可以转换为电能的部分, $T\Delta S$ 是损失的部分。由于化学便览^[2]中给出了这些量 ΔH 、 ΔG 、 ΔS 的反应物质、生成物质,因此就可以计算电位及理论效率(在后面的燃料电池中将进一步讲解)。

以式(3.3)表示的理论效率 η 和下式表示的利用卡诺循环^[3]式的发电装置的效率 η_c 有很大的不同。

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.4)$$

即,在卡诺循环式中,若 T_1 不取大值,则效率低(实际效率为数%或大容量机的约 40%,因此 T_1 必须大于 1500K)。在电学反应中相反,若温度高,效率则下降,即便容量小,没有达到全功率,实际效率为 40%~60%,所以利用化学反应提高直接发电效率是其特征。

3. 一次电池

如图 3.25 所示,一次电池有镍锰干电池、碱性镍锰干电池(简单的碱性电池)、氧化银电池、锂电池等。它们的性能列于表 3.4 中。至于外形尺寸,镍锰干电池和碱性电池从单一型到单四型不等。2004 年,二氧化镍锰和羟基氢氧化镍正极的浮氧干电池问世,而纽扣电池是氧化银电池或锂电池等。这些电池的形状大小由它们的规格决定。还有像照相机用的积层锂电池或助听器用的空气锌

电池等特殊电池。尽管它们的容量很小,但是适合传感器或小型机器人驱动。经过长期对增加容量和减少泄漏的研究,今天的电池已经变得越来越方便使用了。

表 3.4 典型的一次电池的性能^[4]

电池的种类	正极活性物质	电解质(液)	负极活性物质	公称电压/V	能量密度/(W·h/L)
镍锰干电池	MnO ₂	ZnCl ₂ NH ₄ Cl	Zn	1.5	200
碱性干电池	MnO ₂	KOH (ZnO)	Zn	1.5	320
氧化银电池	Ag ₂ O	KOH NaOH	Zn	1.55	450
空气电池	O ₂	KOH	Zn	1.4	1 235
氟化石墨 锂电池	(CF) _n	LiBF ₄ γ-BL	Li	3	400
二氧化镍锰 锂电池	MnO ₂	LiCF ₃ SO ₃ PC+DME	Li	3	400

注:这些溶媒是:γ-BL:γ-丁内酯;PC:丙撑碳酸酯;DME:1,2-二甲氧基乙烷。

4. 二次电池

在二次电池中,铅蓄电池的历史悠久(1860 年问世),时至今日甚至仍然在使用。此外还有镍镉蓄电池(镍镉电池)、镍锌蓄电池等,最近出现的二次电池新产品有镍氢蓄电池、锂离子电池等。本节也将涉及一些正在开发中的二次电池。各种电池的能量密度如图 3.26 所示^[5],它们的特点列于表 3.5 中^[6]。电池的容量有多种选择,因此作为机器人电源的用途很广泛。

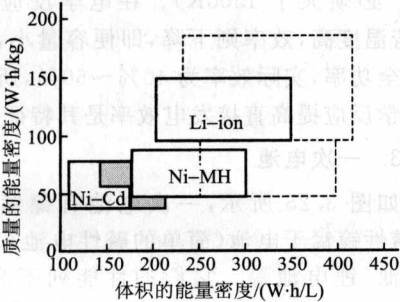
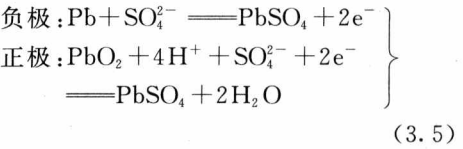


图 3.26 典型的二次电池的能量密度比较^[5]

1) 铅蓄电池

铅蓄电池从 1860 年起就已经被实用化了。它的能量密度比其他的二次电池小,但是目前这一不足正在被改善。它的优点是廉

价、通用性强,故有广泛的应用。它的公称电压为 2V。它的缺点是如果过度放电,电极表面就会堆积 PbSO₄,导致电阻上升最后失效。



2) 镍镉蓄电池(镍镉电池)

1902 年问世的镍镉蓄电池是使用碱性电解液的杨格纳蓄电池的一种。杨格纳当时曾经与爱迪生的发明进行竞争,结果以爱迪生的铁镍蓄电池胜出。不过,铁镍蓄电池真正的实用化是 1960 年以后的事情,它的公称电压为 1.2V。

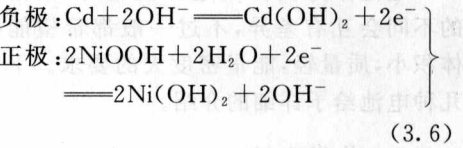


表 3.5 各种二次电池的特点^[6]

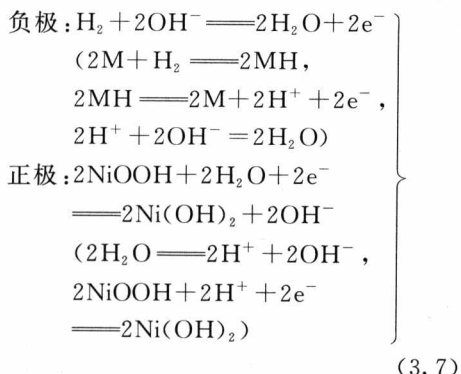
二次电池的种类	过充电	过放电	快速充电	快速放电
铅蓄电池	⊙	×	○	⊙
镍镉电池	×	⊙	⊙	⊙
镍氢电池	×	⊙	○	○
锂离子电池	×	×	△	△

⊙表示可以,△表示尚可;×表示不可以。

3) 镍氢电池(Ni-MH)

镍氢电池的特点是负极采用氢气吸留合金(M)。氢气吸留合金来自于多孔体,其中可以储藏氢气,同时由于是多孔体,表面被活性化,促进了负极的氢氧反应。氢气吸留合金被发现后于 20 世纪 90 年代用于二次电池的实用化。有各种各样的氢气吸留合金 M,广为人知的是 MmNi₅(Mm 表示铈合金,是 La、Ce 等稀土类元素的集合体)。

至于正极,一般采用活性物质,与镍镉二次电池相同,都是羟基氧氢酸化镍,在正极实现还原反应。如果反过来充电,那么可以观察到它的逆反应。仔细观察下面的反应方程式会发现,在各极都要进行 2~3 阶段的反应。电解液是 KOH 水溶液,公称电压是 1.2V。观察反应能够发现负极的氢气吸留合金就是氢的“宿主”。由于全部反应均仅仅与氢反应有关,故电解液的浓度并不发生变化。

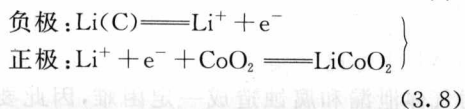


4) 锂离子电池

锂金属是最具有离子化倾向的金属,由于它所取得的电位很高($\text{Li} \longrightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$; 3.05V(氢反应基准)),所以它是电池负极最理想的材料,与其他电池相比,它可以获得单位体积或单位质量最高的能量密度。但是,如果不采取任何措施,由于反应的活性高,必须绝对避免水分,因此锂离子电池最大的技术瓶颈是不能使用传统的水溶液电解液,必须探索非水电解液,这一度成为其实用大幅度推迟的原因。

再者,如果锂金属作为负极,在充电时,锂金属在电极表面的还原析出不均匀,呈现树枝状析出的倾向,这样容易造成电极之间短路的危险,所以其仅限于小容量纽扣电池的使用。从20世纪90年代中期开始,正极改成锂钴氧化物的离子化合物,负极改成多孔碳,电解质则选用含有锂盐的有机电解质,于是二次电池的电动势得到了提高,实用化成为可能。这种电池的公称电压是3.7V。从那以后,又改进成更廉价的锂锰氧化物(LiMn_2O_4)等。其结果使移动电话一类小型、质量轻的产品迅速地得到普及。按照传统,电池占到移动电话质量的一半,因此减轻质量的效果相当明显。

下面给出的电极反应是锂电池的放电、充电反应。正极选择离子化合物,使锂离子确实返回原来的“宿主”,虽然容积密度多少有点下降,但安全性比使用锂金属好得多。再加上选用了非水系的有机电解质,减少了其本身的放电,使应用温度范围扩大,结果使电动势从3V提高到4V,在各类电池中最高。



5) 开发中的其他主要二次电池

现在人们正在开发各种各样的二次电池,其中有钠硫化电池(NAS电池),目前正在进行它的实用化现场试验(输出为数十千瓦到数兆瓦),已经接近实用化的程度。这个电池的负极是钠,正极是硫磺,电解质是含有 β -氧化铝的陶瓷。正极的硫磺在常温下为固态,电阻很高,所以只有在高温(约350℃)熔融态下才能发挥其基本功能,呈现出优良的体积能量特点。除此之外,在众所周知的二次电池中还可以举出氧化银或镍锌电池。选氧化银或镍的氧化物作为正极,电解液是KOH的碱性水溶液。

6) 二次电池的用途

从古到今,二次电池一直被用于汽车或工业叉车的电源。不过它们一般使用铅蓄电池。由于廉价的原因,将来仍然会继续使用它们。

随着无绳设备的普及,对新型二次电池的需求越来越迫切,例如,它已经为移动电话、笔记本电脑等所不可缺少。输出功率大的设备一般使用镍镉电池,或者铅蓄电池。日本国内所出售的移动电话或笔记本电脑最初使用镍氢电池或锂离子电池,最近锂离子电池基本占据了主导地位。另外,由于镍氢电池的输出得到大幅度提高,生产的数量一直比锂离子电池多。在自动化办公设备小型化和轻量化的进程中,电池占有的重量比重逐渐增大,因此可以预期对高能量密度锂离子电池的需求量将逐渐增多。与此同时,还出现了将锂离子电池电解液做成凝胶状的聚合物电池,筑波大学名誉教授白川先生(2000年诺贝尔奖获得者)发明了从乙炔聚合体类有机物导电物质作为电极的电池,进一步挖掘了电池在质量方面的潜力。这将是未来开发锂金属电池不可缺少的材料。

新型二次电池在大容量设备上的应用可以举出电动汽车的例子。1970年,日本以国家大型研究计划的形式开展了新型电池的试制。后来,从20世纪80年代到90年代,进行了电力储备方面的开发。在这些开发中发现,目前有望进入实用化的电池就是锂离子电池。

作为防止公害的措施之一,2003年美国加利福尼亚州颁布了一部法律(ZEV: Zero

Emission Vehicle, 零排放车辆), 计划推动10%的汽车使用电动汽车, 于是引发了电动汽车二次电池开发的投资热。众所周知, 零排放非电动汽车莫属, 因此电动汽车使用的二次电池开发开展得很热闹。现在的问题是它比不上一次充电所能达到的行走距离, 充电可利用的基本设施也不完备, 因此只在极有限的范围内被实用化。所以, 首先实现实用化的是发动机与二次电池的混合型汽车, 它既克服了发动机的缺点, 又把燃料费用限制在可接受的范围内。混合型汽车目前使用镍氢电池, 不过锂离子电池就要应用了。

如上所述, 二次电池具有广泛的用途, 在机器人电源方面也大有用武之地。

5. 燃料电池

1) 燃料电池的原理

燃料电池属于发电装置, 所以它的效率很重要。如前所述, 它的理论效率很高。表3.6给出了典型反应的理论效率与电动势。燃料电池的反应原理和电池构成描绘在图3.27中。如图3.27所示, 如果向负极供给氢气, 触媒表面(有很大的反应表面积)和电解质之间将产生反应, 生成氢离子和电子。氢离子在电解质中移动到正极, 电子则流经外

电路做功后再回流入正极。向正极供给氧气, 氢离子与电子反应生成水。这时, 反应的条件是触媒和电解质之间的反应表面积很大。

表 3.6 典型的燃料电池的电动势与理论效率

燃料	反 应	$\Delta H/(\text{kJ}/\text{mol})$	$\Delta G/(\text{kJ}/\text{mol})$	理论 功率/%	电动势 /V
氢	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	-286	-237	83	1.23
甲烷	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-890	-817	92	1.06
一氧化碳	$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	-283	-257	91	1.33
乙炔	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-727	-703	97	1.21

图3.27中的情况属于酸性电解质的例子, 如果换成碱性电解质, 那么阴离子从正极经过电解质移动到负极。当然, 电流的流动不会随电解质种类的变化而改变。

2) 燃料电池的种类和特点

燃料电池的种类有: ①根据电解质进行分类, 而且电解质的种类与温度还有关; ②根据燃料加以区分。

表3.7是最近已经接近实用化的, 或者正处于开发研究中的燃料电池。

如表3.7所示, 燃料电池的名称与它的历史有密切的关系。即燃料以氢气为主的场合, 是根据电解质的种类来划分; 燃料不同的场合, 则由燃料的种类来划分。所谓常温下工作类型是指在低于100℃条件下工作的燃料电池。

以氢气为主的燃料电池, 温度越高虽然理论效率有所下降, 但是却呈现出以下优点:

- ① 如果工作温度超过500℃, 触媒中可以省去白金等贵金属。
- ② 排热的利用范围扩大, 排出的热可用于发电。
- ③ 电解质的电阻下降, 离子移动变得活跃。
- ④ 高温下工作的装置比较紧凑。
- ⑤ 氢气需要改性, 甲烷和一氧化碳等也是燃料。

由于其具有上述优点, 部分固体电解质型燃料电池已经实用化了。可是, 由于高温, 对气体泄漏和腐蚀造成一定困难, 因此要大

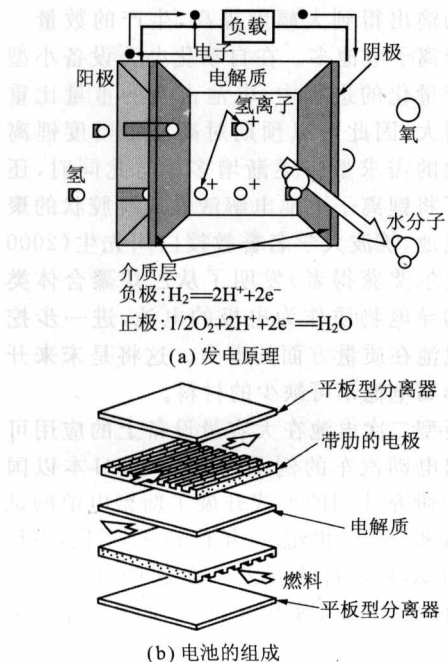


图 3.27 燃料电池的发电原理与电池的组成

面积普及尚待时日。

3) 燃料电池系统与用途

1839年, Globe 开始了燃料电池的实验, 但是直至1960年燃料电池才在宇宙飞船中得到使用。以此为契机, 日本国内也开始进行燃料电池的研究开发。当时, 主要开展对碱性电池的研究, 因为人们看重它比酸性电池的反应性能更好这一点。可是后来发现, 在使用空气时, 碳酸气会造成电解质的恶化, 于是便中断了开发。20世纪70年代的第二次石油危机, 使人们认识到确保替代石油能源的必要性迫在眉睫, 因此燃料电池再次被列入日本国家计划开始开发。那时所采用的

电池是酸性磷酸型燃料电池。这个电池的特点是: ①可以使用城市燃气(通过触媒水蒸气改性, 改性成富含氢的燃气), 所以随处可取。②输出功率的水平为数千瓦至数兆瓦, 可胜任家庭及至中等规模的发电规模。即可改变传统的集中发电为分散发电, 甚至现场发电。③发电效率为40%~50%, 还可以有效地利用现场发电的排热。④用于空调房间或澡堂的供热综合效率可达80%以上。图3.28给出一个这样的发电系统的例子。系统除了燃料电池本身以外, 还有改性器、直流-交流转换系统等。之后, 开发研究一直持续至今, 今天在各地建成了不少实验发电厂正现场运行。

表 3.7 燃料电池的种类

种 类	直接甲醇型 (DMFC)	固体高分子型 (PEFC)	磷酸型 (PAFC)	熔融碳酸盐型 (MCFC)	固体电解质型 (SOFC)
工作温度/℃	常温	常温	200 左右	650 左右	1000 左右
燃料 负极 正极	乙醇空气 (O ₂)	H ₂ 空气(O ₂)	H ₂ 空气(O ₂)	H ₂ 、CO、 空气(O ₂)	H ₂ 、CO、CH ₄ 空气(O ₂)
电解质 材料 离子	IEM、H ₂ SO ₄ 、 H ⁺	IEM H ⁺	H ₃ PO ₄ H ⁺	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ CO ₃ ²⁻	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃) O ²⁻
电极材料 触媒	多孔石墨板 白金系	多孔石墨板 白金系	多孔石墨板 白金系	Ni-Cr, Ni 系 —	Ni, La-Ni 系 —

注: IEM 为离子交换膜。

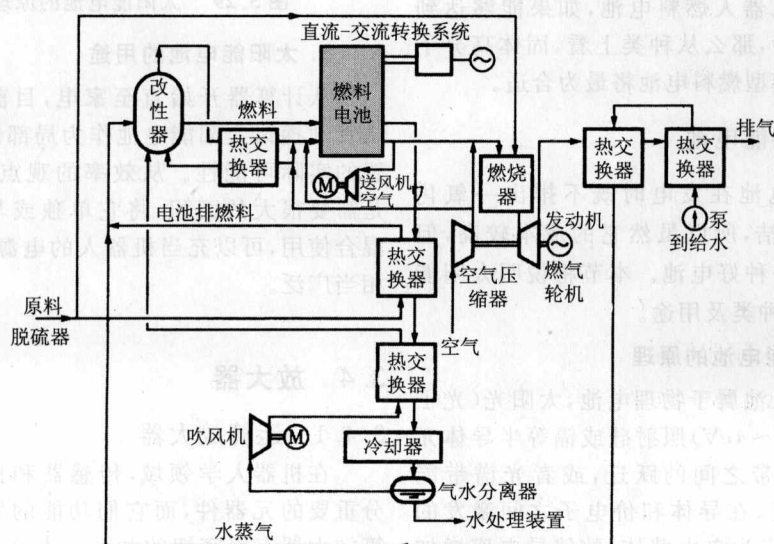


图 3.28 燃料电池发电厂的系统图^[6]

进入20世纪90年代,人们尝试把电解食盐工业一度开发的氟系阳离子交换膜用于燃料电池,得到了固体高分子型燃料电池。目前,虽然膜的耐热性仍不大好,工作温度仅在80℃左右,不过固体高分子燃料电池的性能已经不错了。这种电池比较合适的功率输出为数千瓦至数十千瓦,作为汽车或家庭电源而受到青睐。在世界上已经有数量不多的几台投入了使用。公交车、出租车等可以利用氢燃料,但是一般的汽车比较适合甲醇燃料,而对于普通家庭来说城市燃气更适合。不过,为此甲醇、城市燃气等都需要经过水蒸气改性,使其变成富含氢气的燃气。在改性过程中,会有一氧化碳产生,它将降低电池的性能,当务之急就是研究如何大幅度减少一氧化碳的影响。

直接应用甲醇为燃料的燃料电池也正处于开发之中。与使用氢气的场合相比,虽然这种电池的发电效率较低,但无须经过上述改性处理。目前,面向下一代电动汽车的应用,正在开发的项目有高耐热性离子交换膜,不仅在常温下,而且在高温下也能供给甲醇的燃料电池等。另外,适合便携式电子设备电源使用的、能提供液态甲醇的超小型燃料电池的研究也在进行之中。

如上所述,目前已经进入普及燃料电池使用的时代,在21世纪它们将不可或缺。

具体到机器人燃料电池,如果能够达到实用程度的话,那么从种类上看,固体高分子型或甲醇直接型燃料电池将最为合适。

3.3.2 太阳能电池

太阳能电池在发电时既不排出一氧化碳,又十分清洁,所以虽然它的成本较高,但仍然不失为一种好电池。本节将说明太阳能电池的原理、种类及用途。

1. 太阳能电池的原理

太阳能电池属于物理电池,太阳光(光子的能量为0.3~4eV)照射硅或锗等半导体元件,由于光谱带之间的跃迁,或者光谱带能级之间的跃迁,在导体和价电子之间激发的电子-正穴对成为自由载体,致使导电率增加(光电效应),产生电流。图3.29所示为原理图。

2. 太阳能电池的种类

根据材料将太阳能电池的种类主要划分为单晶硅、多晶硅、非晶硅、化合物半导体等。

单晶硅已经有应用,效率高达20%以上,但价格昂贵。多晶硅虽然价格便宜,效率却稍偏低(约18%)。非晶硅产量高、价廉,结构具有柔性,用途广泛,缺点是效率低(10%左右)。据报道,化合物半导体效率很高(35%),将来有望被广泛使用,但是目前尚未实用化,所以其价格相当昂贵。

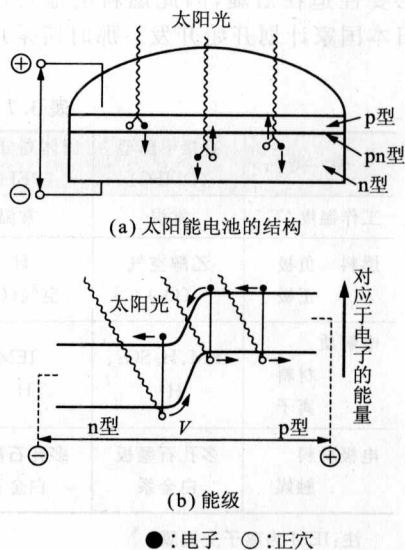


图3.29 太阳能电池的原理^[8]

3. 太阳能电池的用途

从计算器开始直至家电,目前人们正在认真地探讨太阳能电池作为局部地区发电装置的实际可能性。从效率的观点看,其缺点是需要很大的面积,将它单独或与二次电池混合使用,可以充当机器人的电源使用,用途相当广泛。

津久井 勤

3.4 放大器

3.4.1 运算放大器

在机器人学领域,传感器和控制器是十分重要的元器件,而它们功能的发挥又与运算放大器有着密切的关系。本节从用户的角度针对运算放大器的基础知识作一些讲述。本节的内容也许与“动力源”这个题目略有偏

离,不过因为与下一节的功率放大器的内容有紧密的关联,所以有必要先介绍一些准备知识。

1. 运算放大器的特点与负反馈的含义

在放大电路的基本构成中,晶体管或 MOSFET 是必不可少的。不过放大电路基本上都存在着畸变和饱和特性,因此用晶体管或 MOSFET 组成的简单放大电路很难具有良好的线性。运算放大器(以下简称“OP 放大器”)的放大系数很大,又具有负反馈,可以实现稳定且高线性的放大电路。正因为如此,OP 放大器被广泛用于高线性的检测电路和控制电路中。

图 3.30 所示为单个 OP 放大器的基本结构。

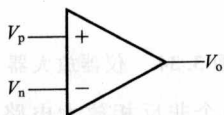


图 3.30 OP 放大器的基本结构

OP 放大器的开环特性可以用下式表示:

$$V_o = \alpha(V_p - V_n) \quad (3.9)$$

式中, α 为差动电压增益。必须注意的是,OP 放大器的实际输出电压受到使用电源电压的影响,会出现饱和现象。理想 OP 放大器的特性应该是当差动电压增益及输入阻抗为 ∞ 时,输出阻抗为 0。差动电压增益为 ∞ 指如果无负反馈施加于 OP 放大器上,它仅仅输出饱和电压值,其符号的正负由 $(V_p - V_n)$ 决定(利用这个特性制成的 OP 放大器叫做运算比较器)。

下面来看负反馈的作用,参见如图 3.31 所示的电路。该电路从放大系数 α 的放大器输出端经由 β 倍的衰减器将负反馈施加到输入端。该电路的输入输出关系可以从下式求出:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\beta + (1/\alpha)} \quad (3.10)$$

式中,如果是理想 OP 放大器的话,有 $\alpha = \infty$,于是得到

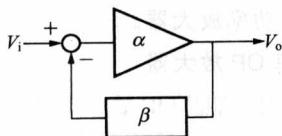


图 3.31 负反馈的意义

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\beta} \quad (3.11)$$

故可知,衰减器的倍率 β 决定了输入输出关系为有限值。也就是说,由于负反馈的原因,对放大电路的非线性做补偿后,就能实现高线性度和稳定放大器。

2. 实际 OP 放大器的计算

实际设计 OP 放大电路时,为了掌握它的输入输出关系,应该在前述理想 OP 放大器特性的基础上,再加上一条假想短路的概念。如前所述,施加负反馈后输出电压为有限值。在此状态下,为了使式(3.9)所示的开环特性成立,差动输入电压 $(V_p - V_n)$ 的值必须接近 0。于是, V_p 与 V_n 的电位应该无限接近,甚至可以认为在理想情况下 $V_p = V_n$,称之为假想短路。在某种程度上,这意味着两个端子的电压相等,但是要注意,不能认为它们实际上就是接地的状态。

下面举例说明如何利用理想 OP 放大器的特性和假想短路的概念进行 OP 放大器的计算。图 3.32 称为 OP 放大器电路组成的最基本的反相放大电路。

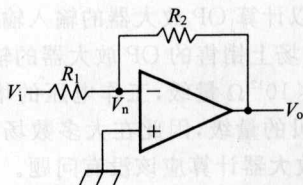


图 3.32 反相放大电路

从图 3.32 可知,非反相输入端子的电位 V_p 是 0V。于是,由假想短路的概念可以将反相输入端子的电位 V_n 视为与 V_p 相等。人们把输入端子具有接地电平时的假想短路特别地称为假想接地。另外,如果考虑输入阻抗为 ∞ 的所谓理想 OP 放大器的特性可知,流过电阻 R_1 的电流全部流入电阻 R_2 ,而不流入 OP 放大器本身。根据上述两种设想,如果将 $(V_i - V_o)$ 之间的电路按照图 3.33 所示进行分离,那么就有下式成立:

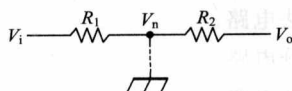


图 3.33 $V_i - V_o$ 间的等效电路

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{V_o}{R_2} \quad (3.12)$$

整理式(3.12),可以得到输入电压与输出电压的关系为

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (3.13)$$

也就是说,增益仅仅由两个电阻值 R_1, R_2 决定。

晶体管电流放大系数 h_{EF} 是工作点处的名义值,由于制造的原因,该参数有相当大的分散性,此外,随驱动电流、温度等的影响它还会产生不小的变动。但是,由上式可知,该电路的输入输出特性不受 OP 放大器内部工作电压增益的影响,仅由外部电阻决定。若果真如此,购入高精度且参数受温度变化影响很小的电阻极其简单,于是就有可能制作出合适的电路来满足希望的线性特性。

不过,即使 OP 放大器采用了理想的 OP 放大器,也应该注意这个电路整体的输入阻抗必须是无穷大。根据上面推导的输入电压与流入的电流的关系,该电路的输入阻抗为

$$Z_i = R_1 \quad (3.14)$$

这表明,基于理想 OP 放大器特性与假想短路的概念可以计算 OP 放大器的输入输出特性。实际上,市场上销售的 OP 放大器的输入阻抗都达到 $1 \times 10^{12} \Omega$ 量级,工作电压的增益至少有数十分贝的量级,因此在大多数场合,按照理想 OP 放大器计算应该没有问题。可是,由于电路的目的和用途不同,有时候应该注意是否应该带入实际参数值。

3. 用于运算电路

在机器人领域,OP 放大器的用途之一就是实现期望的控制器。这时,需要有加法、乘法、微积分、相位补偿等基本运算功能。我们列举了一些实现上述运算功能的典型 OP 放大器基本电路。在这里我们略去电路的具体计算,而且计算的基本概念与前面的反相放大电路相似。

- ① 反相放大电路。
- ② 非反相放大电路。
- ③ 加法电路。
- ④ 微分电路。
- ⑤ 积分电路。
- ⑥ 相位补偿。

4. 用于检测电路

有些场合,典型的如应变片搭建的桥式电路,需要利用高增益放大器将两点之间的电压差放大,转换成实用的信号水平。满足这种要求的 OP 放大器电路就是人们熟悉的仪器放大器。仪器放大器属于差动放大电路的一种,适合高增益的精密电压放大。它的电路如图 3.34 所示。

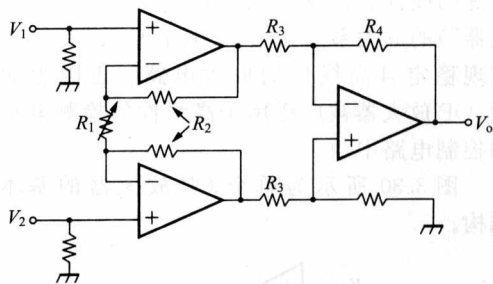


图 3.34 仪器放大器

电路由两个非反相放大电路和差动放大电路组合而成,输出电压 V_o 。由下式求出:

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) (V_2 - V_1) \quad (3.15)$$

该电路有两大特征:第一,两个输入端子都仅与 OP 放大器的输入部分连接,所以输入阻抗极高,因此受信号源阻抗的影响非常小;第二,两个输入电路有对称性,随着增益的调整,对称性仍然保持。

3.4.2 功率放大器

前面所述的 OP 放大器是放大器在机器人学领域应用的一个方面,下面介绍控制器具体的实现方法。在具体的电路中,OP 放大器用于信息处理,即把电压转换为可供利用的信息。从高效率利用能源的角度看,应该控制流过电路的电流为最小。在计算机进行信息处理的时候,也面临同样的问题。

不过,将 OP 放大器电路或计算机处理决定的控制量输入伺服器时,需要加进一个电路,它具有一定的输出阻抗,以便产生足够的电流,给驱动器施加足够的电压。扮演这个角色的就是功率放大器。

1. 功率 OP 放大器

如前所述,理想 OP 放大器的输出阻抗是 0。这就意味着无论输出端要求多大的电流它都能办到。可是,OP 放大器的输出端在大

多数情况下都与其他 OP 放大器的输入端连接着,设计时基本上可以认为 OP 放大器是与高输入阻抗连接的。因此,它的实际输出阻抗并不很大。相应地,考虑到与低阻抗负载连接的用途,OP 放大器也可以按照大的输出电流来设计,一般称之为功率放大器。

功率放大器与一般的 OP 放大器的不同点仅仅在于输出大电流的那一部分,除此之外,两者几乎没有区别。处理大电流时必须注意的最大问题是 OP 放大器内部允许的损耗和它的放热措施。工作状态不同,OP 放大器内部所消耗的功率变化也极大,在能量效率很差的区域功率损耗相当多,所以需要进行合理的散热设计。

实际情况是,市场上销售的功率放大器产品大多数的最大电流为 1A 左右,当然也有 3~10A 左右输出电流的放大器。放大器的外形也应该适应散热的要求,例如,配备散热风扇,安装散热板片等。

功率 OP 放大器充当功率放大器的优点是放大器本身兼有控制器,所以设计和安装十分简单。因此,它很适合用于各种实验。不过,从能量效率的观点看还有点问题,即它必须备用两个电源。特别是自主移动式机器人,对搭载电源有严格的限制,能量效率要求比较高,因此很难说功率放大器是比较合适的选择。

2. 线性功率放大器

由电流放大晶体管(功率晶体管)组成的功率放大器对性能规格的适应范围较宽,在市场上有大量出售,很便于组成能满足各种要求的功率放大器。其中典型的例子就是线性功率放大器,其基本原理如图 3.35 所示。

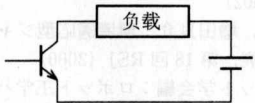


图 3.35 线性功率放大器的基本电路

这个电路的基本思想就是用晶体管和负载将电源电压进行分压,以此来调整加在负载上的电压。如前所述,晶体管本身的参数 h 在制造时分散性很强,受温度影响大,不采取措施难以得到稳定的动作。还有一个问题是,图 3.35 中流过负载的电流仅沿一定方向

流动。在机器人学领域,功率放大器驱动的对象多数是电机,它们需要双向驱动,电流单向流动显然不合适。

基于上面的实际问题,将线性功率放大器电路改成如图 3.36 所示。

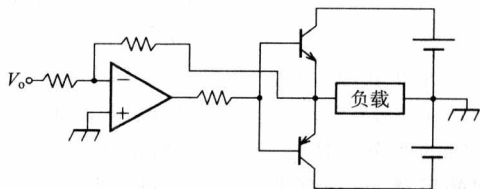


图 3.36 双向线性放大器

在图 3.36 的电路中,用 OP 放大器将反馈返回到施于负载的电压上,这样有利于消除因晶体管参数变动而产生的影响。通过使用复合晶体管对与两个电源,负载电流可以按照输入信号的符号方向流动。

如前所述,电路利用负载和晶体管来进行分压,起到了调整负载电压的作用。晶体管所消耗的能量相当于施加在晶体管上的电压与负载电流的乘积。因此,需要充分考虑输出端晶体管的选择以及它的散热对策。

组成这个电路的元器件比较多。实际上,尤其是在电机驱动器这种功率放大器的典型应用场合,在市场上可以购得所需元器件全部 IC 化的电机驱动器商品。电机容量较小时,则选用专用 IC 会更方便一些。

3. PWM 放大器

基于 PWM(Pulse Width Modulation, 脉宽调制)放大器驱动方式的 H 桥式功率放大器经常被用于机器人数十瓦级的电机驱动电路。

在前述线性功率放大器中曾经谈到,位于输出极的晶体管产生功率消耗。通常,该部分功率通过散热片向外排出热量,因此它存在能量损失相当大的缺点。但是,在这种方式中,如果晶体管完全是 on 或完全是 off 的场合并不造成能量损失。之所以如此的原因是晶体管在 on 的状态时给晶体管施加电压,以及在 off 的状态时流过晶体管的电流均为 0。

基于这个原理,给晶体管反复交互地施加 on、off 的脉冲信号(PWM 信号),就能够降低能量损失,这种方式称为 PWM 驱动方式。不过,虽然此时 on、off 不断反复,为了不引起

电机振动,要求信号的脉冲周期(脉冲信号的频率)设定的要比电机电气时间常数(一般为数毫秒的量级)小。至于对转速的控制,则是根据 on、off 时间的比例,即占空比来实现。

图 3.37 给出了电机驱动器经常使用的 PWM 驱动方式的基本电路。在这个电路中,给电机配置了四个呈 H 状布置的晶体管,它能实现单电源供电的电机正反转驱动,这种方式叫做 H 桥方式。在此基础上,利用把下一级的两个晶体管同时 on,造成电机端子之间的短路,可以实现制动。晶体管的四个状态与正转、反转、制动、停止等四个动作的对应组合如表 3.8 所示。

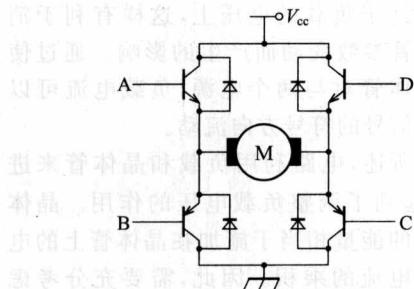


图 3.37 PWM 驱动方式的基本电路

在该电路中,与晶体管并联的二极管叫做续流二极管,由于它的作用,在脉冲输入的 off 期间,储存在电机中的能量得以维持电机的电流,达到了提高效率的效果。

表 3.8 H 桥式中的工作表

状态	输入 A	输入 B	输入 C	输入 D
正转	PWM	off	off	on
反转	off	on	PWM	off
制动	off	on	off	on
停止	off	off	off	off

如果向电机下达的指令为模拟电压,就需要与模拟电压值成正比地生成 PWM 的占空比信号。此时最常用的方法是预先准备某个周期的三角波,把它与模拟信号同时输入运算比较器。不过,如果是通过计算机输出指令值,因为市场已经有产生总线界面 PWM 波的现成的 IC 出售,所以可以直接购买来利用。在单片的 MPU 中,大多都嵌入了产生 PWM 波的功能,使用起来非常方便。

稻垣克彦

参考文献

3.1 固定式机器人的动力源

- [1] 加藤・見城・高橋:図解・わかる電子回路,講談社ブルーバックスシリーズ B 1084
- [2] 鈴木,横田:旋回流利用による気泡除去第2報 テーパ形による性能向上,油圧と空気圧,Vol.25, No.4 (1994) pp.543-548
- [3] 日本フルードパワー工業会編:実用空気圧(第3版),日刊工業新聞社(2000) p.53
- [4] 張護平:空気圧制御弁の種類,特徴および選定,機械設計(油圧・空気圧シリーズ 21),Vol.43, No.2 (1999) pp.48-61

3.2 移动式机器人的动力源

- [1] 竹原健ほか:燃料自動交換機,原子力工業,Vol.27, No.10 (1981) pp.9-12
- [2] 中村日出雄:原子力発電所用機器診断装置の開発,日立評論,Vol.62, No.9 (1980) pp.41-44
- [3] 大道武生ほか:原子炉格納容器内移動式軽作業ロボットの開発,三菱技報,Vol.22, No.6 (1980) pp.113-117
- [4] 宮沢竜雄:原子力発電所向けのロボット技術,東芝レビュー,Vol.39, No.11 (1984) pp.953-956
- [5] 中山良一ほか:原子力格納容器内自動点検システム一点検車のケーブル処理装置の開発,昭和電線電纜レビュー,Vol.36, No.1 (1986) pp.89-96
- [6] NEC パーソナルロボット「PaPeRo」, PaPeRo ページ, <http://www.incx.nec.co.jp/robot/>
- [7] 総合警備保障ガードロボ C3 型,総合警備保障(株)ホームページ, <http://www.sok.co.jp/>
- [8] 浦野高志:非接触型充電器ユニット,PRODUCT Hotline magazine (TDK NOW), Vol.22 (1997) pp.1-6
- [9] 柴田貴行ほか:マイクロ波エネルギー電送を用いた自律移動可能なマイクロロボット,デンソーテクニカルレビュー,Vol.5, No.1 (2000) pp.20-25
- [10] 稲垣克彦:多脚型歩行ロボットに関する研究,計測技術,Vol.25, No.8 (1997) pp.49-53
- [11] 則次俊郎,韓 建海:ウェアラブルロボットのための小型コンプレッサの開発,ROBOMEC'02, 1A1-F09 (2002)
- [12] 塚越秀行ほか:瓦礫踏破能力の向上を目指した脚収納型ジャンピングロボット,ROBOMEC'02, 2P2-A05 (2002)
- [13] 柴田智弘,増田良介:環境適応型ジャンピングロボットの開発,第18回RSJ(2000)
- [14] 日本ロボット学会編:ロボット工学ハンドブック, V編 7.2, コロナ社(1990)

3.3 電池

- [1] 池上雄作:化学熱力学,放送大学教育振興会(1995)
- [2] 電気化学協会編:電池化学便覧,丸善(1985)
- [3] 阿部龍蔵,堂寺知成:エネルギーと熱,放送大学教育振興会(1998)
- [4] 川内晶介,飯島孝志,川瀬哲也監修:新しい電池技術のはなし,工業調査会(1994)
- [5] 芳尾真幸,小沢昭弥:リチウムイオン二次電池,日刊工業新聞社(2000)

- [6] OHM「二次電池特集号」(1999-4, 1999-2) から
 [7] 浜川圭弘, 桑野幸徳: 太陽エネルギー工学: 太陽電池, 培風館 (1994)
 [8] 高橋清: 電機評論, Vol.10 (1980) p.844

3.4 放大器

- [1] 角田秀夫: 実用オペアンプ回路, 東京電機大学出版局 (1983)
 [2] 西堀賢司: メカトロニクスのための電子回路基礎, コロナ社 (1993)

低来本用, 1. 齒輪及齒輪系の分類
 (1) 按齿形分類 (a) 漸开线齿形 (b) 摆线齿形 (c) 圆弧齿形 (d) 其他齿形
 (2) 按齿面接触形式分類 (a) 外啮合 (b) 内啮合 (c) 齿条传动 (d) 蜗轮蜗杆传动 (e) 行星传动 (f) 其他传动

(3) 按传动比分類 (a) 定传动比 (b) 变传动比 (c) 无级变速 (d) 其他

(4) 按传动精度分類 (a) 高精度 (b) 中精度 (c) 低精度 (d) 其他

(5) 按传动效率分類 (a) 高效率 (b) 中效率 (c) 低效率 (d) 其他

(6) 按传动寿命分類 (a) 长寿命 (b) 中寿命 (c) 短寿命 (d) 其他

(7) 按传动成本分類 (a) 低成本 (b) 中成本 (c) 高成本 (d) 其他

(8) 按传动结构分類 (a) 简单结构 (b) 复杂结构 (c) 其他

(9) 按传动应用分類 (a) 通用 (b) 专用 (c) 其他

(10) 按传动材料分類 (a) 金属材料 (b) 非金属材料 (c) 其他

(11) 按传动加工工艺分類 (a) 铸造 (b) 锻造 (c) 其他

(12) 按传动维护分類 (a) 易维护 (b) 难维护 (c) 其他

(13) 按传动安全分類 (a) 安全 (b) 不安全 (c) 其他

(14) 按传动环保分類 (a) 环保 (b) 不环保 (c) 其他

(15) 按传动节能分類 (a) 节能 (b) 不节能 (c) 其他

(16) 按传动可靠分類 (a) 可靠 (b) 不可靠 (c) 其他

(17) 按传动耐用分類 (a) 耐用 (b) 不耐用 (c) 其他

(18) 按传动美观分類 (a) 美观 (b) 不美观 (c) 其他

(19) 按传动性能分類 (a) 性能良好 (b) 性能一般 (c) 性能差 (d) 其他

(20) 按传动质量分類 (a) 质量好 (b) 质量一般 (c) 质量差 (d) 其他

(21) 按传动价格分類 (a) 价格低 (b) 价格一般 (c) 价格高 (d) 其他

齿形, 1. 齒輪及齒輪系の分類
 (1) 按齿形分類 (a) 漸开线齿形 (b) 摆线齿形 (c) 圆弧齿形 (d) 其他齿形
 (2) 按齿面接触形式分類 (a) 外啮合 (b) 内啮合 (c) 齿条传动 (d) 蜗轮蜗杆传动 (e) 行星传动 (f) 其他传动

(3) 按传动比分類 (a) 定传动比 (b) 变传动比 (c) 无级变速 (d) 其他

(4) 按传动精度分類 (a) 高精度 (b) 中精度 (c) 低精度 (d) 其他

(5) 按传动效率分類 (a) 高效率 (b) 中效率 (c) 低效率 (d) 其他

(6) 按传动寿命分類 (a) 长寿命 (b) 中寿命 (c) 短寿命 (d) 其他

(7) 按传动成本分類 (a) 低成本 (b) 中成本 (c) 高成本 (d) 其他

(8) 按传动结构分類 (a) 简单结构 (b) 复杂结构 (c) 其他

(9) 按传动应用分類 (a) 通用 (b) 专用 (c) 其他

(10) 按传动材料分類 (a) 金属材料 (b) 非金属材料 (c) 其他

(11) 按传动加工工艺分類 (a) 铸造 (b) 锻造 (c) 其他

(12) 按传动维护分類 (a) 易维护 (b) 难维护 (c) 其他

(13) 按传动安全分類 (a) 安全 (b) 不安全 (c) 其他

(14) 按传动环保分類 (a) 环保 (b) 不环保 (c) 其他

(15) 按传动节能分類 (a) 节能 (b) 不节能 (c) 其他

(16) 按传动可靠分類 (a) 可靠 (b) 不可靠 (c) 其他

(17) 按传动耐用分類 (a) 耐用 (b) 不耐用 (c) 其他

(18) 按传动美观分類 (a) 美观 (b) 不美观 (c) 其他

(19) 按传动性能分類 (a) 性能良好 (b) 性能一般 (c) 性能差 (d) 其他

(20) 按传动质量分類 (a) 质量好 (b) 质量一般 (c) 质量差 (d) 其他

(21) 按传动价格分類 (a) 价格低 (b) 价格一般 (c) 价格高 (d) 其他

(22) 按传动寿命分類 (a) 长寿命 (b) 中寿命 (c) 短寿命 (d) 其他

(23) 按传动效率分類 (a) 高效率 (b) 中效率 (c) 低效率 (d) 其他

(24) 按传动精度分類 (a) 高精度 (b) 中精度 (c) 低精度 (d) 其他

(25) 按传动成本分類 (a) 低成本 (b) 中成本 (c) 高成本 (d) 其他

第4章 机构

机构产生机器人的运动,它是左右机器人性能的重要因素,其中包括有效地控制驱动器的运动速度而输出动力的机构、变换转动或直线等运动方向的机构、用于约束运动的关节机构等。本章就构成这些机构的各种零件的原理、特性和使用方法加以说明。

4.1 运动传动机构

为了把驱动器的运动转化成机器人的运动,除直接驱动以外,还需要运动速度的变换、运动方向的变换、连续运动与间歇运动的变换等,并且还需要把驱动器的运动传递到位于不同地点的传动机构等。本节就这些运动变换和传递所使用的零件进行说明。实际上机器人的运动传递就是将这些机构组合起来实现的。

4.1.1 齿轮传动

1. 齿轮的种类

从功能上看,根据传递运动的输入与输出轴的位置关系,齿轮可以分为如下类型^[1,2]:

① 平行轴。

② 相交轴(两轴相交)。

③ 交错轴(两轴不相交)。

实际使用的齿轮可以按图 4.1 所示来进行分类。图 4.1(a)~(f)实现平行轴(包含无限远)传动,图 4.1 中的(g)和(h)实现相交轴传动,图 4.1(i)~(k)实现交错轴传动。各种齿轮的特点及使用方法介绍如下。

1) 直齿圆柱齿轮(spur gear)

传递两根平行轴之间的运动,是最一般的齿轮。

2) 斜齿轮(helical gear)

斜齿轮的齿面呈现倾斜状态,与直齿轮相比,它的啮合特性好。该传动的弱点是驱动力矩会引起轴向力。如果斜齿轮的倾斜角为 45° ,它就与后面所述的螺旋齿轮相同。

3) 人字齿轮(double helical gear)

由左右旋向相反的一对斜齿轮组合而成。所以,它能消除轴向力,用于船舶等大型机械的动力传动。

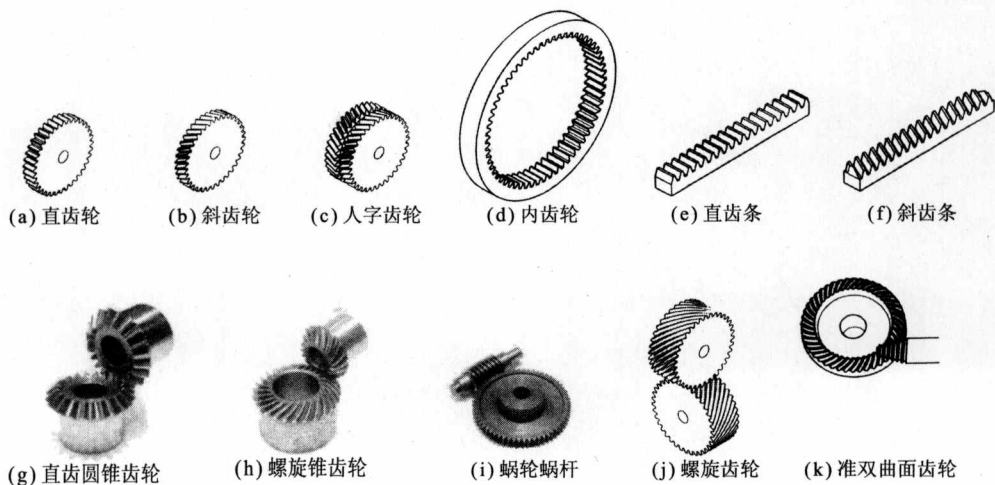


图 4.1 实际使用的齿轮

4) 内齿轮 (internal gear)

在圆环的内侧有齿面的齿轮,除了单独与直齿轮组合成减速器以外,它也是后述的行星齿轮机构的主要构件。

5) 直齿齿条 (rack)

直线上的齿轮,它与直齿圆柱齿轮组合可以进行转动和移动的变换。此时的直齿圆柱齿轮称为小齿轮。

6) 斜齿条 (helical rack)

齿面倾斜的齿条。它与斜齿轮组合,实现平滑运转和直线运动变换。

7) 直齿圆锥齿轮 (miter gear, bevel gear)

实现正交两轴之间的动力传递。 $1:1$ 的圆锥齿轮叫做等径圆锥齿轮,除此之外均叫做圆锥齿轮。齿面是圆锥的一部分,如图 4.2 所示,两个组合的圆锥齿轮的圆锥锥顶点必须与两轴的交点重合。也就是说,对应于两个齿轮的齿数比不同,圆锥的顶角也不同。例如,齿数比为 $1:1$ 的圆锥齿轮与其他齿数比的圆锥齿轮就不能进行组合。

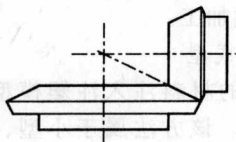


图 4.2 圆锥齿轮的组合

8) 螺旋锥齿轮 (spiral miter gear, spiral bevel gear)

圆锥齿轮的齿面倾斜,可以平滑地进行啮合的齿轮。

9) 蜗轮蜗杆 (worm gear)

蜗轮蜗杆是螺旋状的蜗杆,跟齿面与之相配的蜗轮的组合,单级减速可以获得 $20 \sim 100$ 的较大减速比的传动。除了单条螺旋线的蜗杆外,还有两条螺旋线的蜗杆。由于齿面滑动量大,摩擦力大,传动时仅限于蜗杆主动、蜗轮被动。通常情况下,蜗轮与蜗杆采用不同的材料制成。

10) 螺旋齿轮 (screw gear)

齿面的倾斜角为 45° 的两个斜齿轮啮合来传递两轴之间的动力。由于摩擦力大,传动效率低,常用于机床的进给操纵机构等。

11) 准双曲面齿轮 (hypoid gear)

它属于交错两轴运动传递的圆锥齿轮的一种。用于汽车驱动轴到差动轴的动力传递。

2. 齿形与专业用语

1) 渐开线齿廓

市场上的齿轮几乎都是加工方便的渐开线齿廓。如图 4.3 所示,当发生线沿着圆弧展开时,发生线上某一点的轨迹描绘出齿廓。这个圆叫做基圆。实际齿轮的形状是齿底的曲线和齿顶的圆弧把齿廓截取后组成的部分。另外,在检测等特殊用途中也采用摆线齿廓。



图 4.3 渐开线曲线

2) 直径与模数

对半径无限大的齿条来说,齿分布的间隔叫做标准周节。在圆柱齿轮中,具有周节的齿数倍的直径叫做节圆,它的直径叫做节圆直径。另外,齿轮的轮齿的大小用模数表示。模数等于节圆直径(mm)÷齿数。模数相等的齿轮才有可能啮合。模数大的齿轮传递的力矩大。

3) 压力角

节圆上齿面切线的倾斜角叫做压力角。在 JIS B 1701 中规定,压力角为 20° 。节圆无穷大时就变成齿条,齿廓变成梯形齿廓,而斜边的倾角就是压力角。

4) 变位齿轮

用齿条刀具加工渐开线齿廓的直齿轮时,如果齿轮的齿数太少,齿根会被切掉一部分产生所谓的根切。为了防止出现根切,齿条刀具应该稍微离开齿轮毛坯进行加工。这时,节圆直径大于模数×齿数。这种齿轮就叫做正变位齿轮。在大多数情况下,少于 14 个齿的齿轮都做成变位齿轮。

5) 齿轮的精度

齿轮中存在着周节误差、齿形误差、齿槽波动、齿向误差等。

周节误差就是节圆齿间隔的理想值与实际测量值之间发生的偏差,有相邻齿的间隔误差,即单周节误差;连续三个齿的间隔的

差,也就是相邻的两个周节的差,即相邻周节误差;任意两齿之间的周节的综合误差,即累计周节误差等。

齿形误差就是实际齿面渐开线的偏离程度,从凹侧峰值到凸侧峰值之间的距离。

齿槽波动是指偏离齿轮轴的距离误差,可以把球或销轴放在齿槽的节圆附近测量得到。

齿向误差是指在齿宽方向上齿的角度与齿轮轴线的角度偏差。

在JIS B 1702中,这些误差的许用值规定为从0~8的9个等级。磨削齿轮是1级,通常的切削齿轮为4级左右。

6) 齿隙

两个齿轮啮合时,由于具有齿形误差及热膨胀,为了维持稳定的运转,就需要一定的间隙。这个间隙叫做齿隙(backlash),齿轮啮合间隙。直齿轮和斜齿轮的间隙就是沿圆周方向或与齿面垂直的方向上测得的节圆上的间隙距离。它们为 $50\sim 190\mu\text{m}$ (精度4级、模数为1、节圆直径 $50\sim 100\text{mm}$)。

3. 齿轮的材料

齿轮的材料要求不易引起齿面磨损,齿的弯曲强度大,制造方便。主要采用如下材料:

1) 机械结构用的碳素钢(S45C等)

一般广泛使用该种材料。通过正火等的热处理可以提高齿面的硬度。

2) 铸 铁

用于蜗轮等铸造齿轮,通过切削加工来生成齿面。

3) 铬钼钢

用于重载、高耐磨性齿轮,大多需要经过研磨后制成高精度产品。

4) 不 锈 钢

用于要求耐腐蚀性的齿轮,强度比机械结构用的碳素钢差。

5) 黄 铜

用于模数小的廉价齿轮。

6) 铝青铜

用于蜗轮、螺旋齿轮等滑动较多的齿轮,其耐磨性好。

7) 塑料(聚缩醛、缩醛树脂、尼龙等)

既有注塑产品,也有与金属相同的切削加工成品,价格非常便宜。其优点是除了质

量轻之外,无润滑也可以使用。

8) 硬 铝

市场上基本没有铝合金制造的齿轮,但可以通过切削或放电加工进行制作。其寿命低但质量轻。

4. 齿轮的加工方法

常用的齿面加工方法有以下几种。

1) 切 削

渐开线齿轮原理上可以用齿条型刀具进行加工,但是实际上一般的切削刀具(滚齿刀)呈圆柱形螺旋状,沿轴向带有切槽。滚齿刀每转一周,被切削毛坯就转动一周节。

为了提高钢制齿轮齿面的硬度,一般可以在切削加工后作渗碳或高频淬火处理。

2) 磨 削

对齿面尺寸精度、光洁度要求较高时,要进行磨削处理。

3) 轧 制

用于小型蜗杆等的加工,方法与螺钉的制造方法相同,即让棒料从两个滚子之间穿过,边旋转边加工。

4) 注塑成型

把熔融的材料注入注塑模型中,经过加压进行固化。该方法属于小型、精度不高的树脂齿轮的加工方法。

5) 粉末成型

把金属粉末填入模型腔中,经过压缩、加热、烧结的步骤成型,其具有多孔、润滑剂的浸润性好等优点,可用于大批量生产。

6) 冲压成型

采用冲压的方法进行加工,廉价,能取代注塑成型的产品。

7) 放电加工

通过材料与电极(电蚀或线切割)之间放电形成齿面的方法。在非圆材料上加工非整周的不完全齿轮比较方便。但是,其表面光洁度较差。

4.1.2 丝杠-螺母系统传动

1. 滚珠丝杠^[3,4]

一般的丝杠与螺母之间都会产生摩擦。为了减轻摩擦,可以在丝杠和螺母之间放入滚珠,这种传递运动的机构叫做滚珠丝杠。滚珠丝杠产品一般高精度的需要磨削,而廉价的经过切削加工即可。如图4.4所示,滚

珠的循环路径经由螺母外部循环的,称为外循环方式(弯管方式),另外也有滚珠越过螺母内部进入相邻沟槽返回的内循环方式(反向器方式)。滚珠丝杠的传动效率通常为90%~95%,因此甚至可以将运动反过来传递,即从直线移动转换成转动。丝杠沟道的形状除了圆形外,有时沟底部分也采用小曲率尖拱型。使用时应该注意的是这种螺母只是承受轴向力,其他方向的推力以及转矩必须另外设计其他机构来承受。还有就是如果丝杠较长,它的固有频率就会比较低,这时不但应该注意引起共振的危险速度,而且也要注意压杆稳定等问题。除此之外,在大直径滚珠丝杠高速转动的时候,应该注意DN值(滚珠滚动圆的直径(mm)与转动轴角速度(r/min)的乘积)不应该超过一定的范围(通常为50 000~70 000),这与在球轴承中遇到的使用条件是一样的。

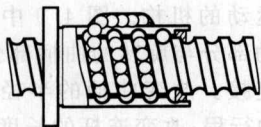


图 4.4 滚珠丝杠

为了消除滚珠丝杠前进方向上的间隙,一般可以采取双螺母预紧的方法。

2. 滑动丝杠

与滚珠丝杠相比,滑动丝杠的摩擦损失大,但其成本低。根据螺纹的形状,它主要有如下分类:

(1) 三角螺纹 三角螺纹最常用的一种螺纹类型,常用于连接。

(2) 矩形螺纹 螺纹的剖面为矩形,在传递重载荷时使用。

(3) 梯形螺纹 螺纹的剖面为梯形,常用于机床的丝杠、精密定位等。

4.1.3 带、链、钢丝传动

1. 三角带

剖面为V字形(准确地说是梯形)的运输带中加入纤维后,经常被用于产业机械、空气压缩机等场合传递电机的连续旋转运动。为了增大传递的能力,三角带常常多根一起使用,有些三角带采用在平带上开出多个V形沟槽的结构。

2. 三角带无级变速机构

三角带在动力传递中,如果如图4.5所示,能够改变带轮的宽度,进而改变带的直径,就可以无级调整变速比。变速传动虽然只限定在转动中,但是其广泛地被用于产业机械中。

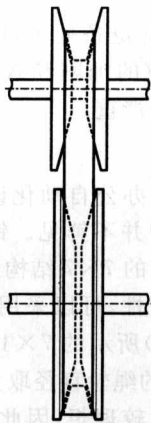


图 4.5 V带无级变速装置

3. 同步带

图4.6是一条带有齿形的平皮带,它们经常被用于输入轴与输出轴的转动要求精确同步的场合。它的齿越大,传递能力就越大。各个厂家都在齿形的设计上下工夫(有的设计成圆弧齿形,有的具有双台阶齿形等),以便与传统的梯形齿形相比具有更大的传动能力。

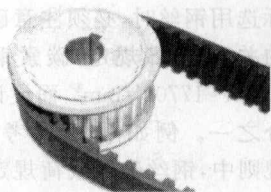


图 4.6 同步带

4. 套筒滚子链

如图4.7所示的链条叫做套筒滚子链。它的大小用链的节距来表示。要想增大传递能力,可以采取增大节距或采用多排链等措施。



图 4.7 套筒滚子链

通常,人们把套筒滚子链用于两个平行轴之间的传动,此时如图 4.7 所示,下侧是个松边。如果进行垂直轴之间的传动,那么重力很容易把链条从链轮上拉脱。另外要注意的是,如果两个轴上下水平布置,那么下边的链轮不能过小,否则由于伸长变形的缘故,链条很容易脱落。

但是,如果让链条处于过于张紧的状态,就又会引起摩擦的加剧和效率的下降,链条的磨损也将变得严重。

5. 钢 丝

多股钢丝在办公自动化设备或小型机器人的动力传递中并不鲜见。钢丝的编织方式以图 4.8(a)所示的 7×7 结构最为常见。如果打算增加其柔软性,可以采用更多的根数,编织成如图 4.8(b)所示的 7×19 的方式。一般认为,缠绕钢丝的绳轮直径取为单根钢丝直径的 400 倍以上比较理想,因此 7×7 的编制结构就应该是 40 倍, 7×19 的结构则大于 35 倍。

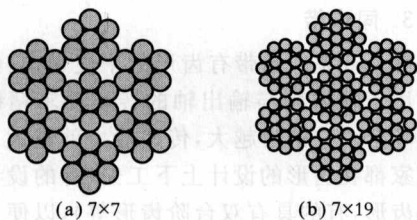


图 4.8 钢丝的线结构

在实际选用钢丝时,必须注意破坏载荷与额定载荷的关系。JIS 规定,碳素钢钢丝的破坏极限为 $1320\sim 1770\text{N/mm}^2$,而设计时应该取该值的几分之一。例如,作为参考,在起重机等的安全规则中,钢丝破坏载荷规定为静载荷的 6 倍以上,也就是说,安全系数应该大于 6。

4.1.4 流体传动

1. 液 压

在液压传动中,可以根据液压缸的直径选择力和速度,也就是能够自由地选择与减速比相当的值。如果同时供给多个液压缸压力,就能组成差动机构。也就是说,可以在位移量不同的多个部位作用相同大小的力。液压设备的有关内容可以参考第 2 篇 2.2 节。

2. 气 压

基于空气压的动力传递的特点是设备简

单、质量轻。不过,如果让它充当运动传递机构,那么在满足位置和速度精确传动方面它存在一定困难,所以基本上让它充当传递动力的机构。由于使用时管路中的空气具有可压缩性,运动传递还会出现延迟。气动驱动主要用于机械手末端的抓持器,实现像门开关那样简单的两位置切换驱动。气动设备和元器件的知识详见第 2 篇 2.3 节。

4.1.5 杆、连杆及凸轮传动

由杆、连杆、凸轮机构组成的传动机构可以把连续旋转运动转换为间歇往复运动,实现不等速运动,即减速比变化的运动传递功能,再进一步甚至能实现空间直线或曲线运动轨迹。在本节中专门就与机器人相关的机构加以讨论。

1. 曲柄滑块机构

图 4.9 所示是典型的把连续转动变换为往复直线运动的机构。图 4.9 中,支持滑块的往复运动部分与旋转的曲柄部分之间通过连杆进行连接。改变曲柄的半径,就会影响往复运动的行程;改变连杆的长度,就会影响往复运动的速度变化特性。该机构限于输入为转动,输出为直线运动的情形。

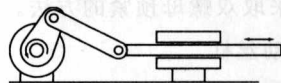


图 4.9 曲柄滑块机构

图 4.10 是采用滑块机构在其他方向上生成直线运动的情形。图 4.10 中点 D 作直线运动。在点 A 处输入转动,或者在点 C 处输入直线运动均可。

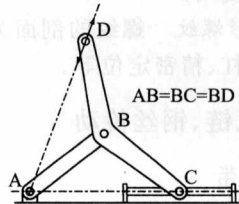


图 4.10 产生直线运动的曲柄滑块机构

2. 肘式机构

肘式机构是指利用在动力传递中减速比无限大的部分,防止从被动部分的反驱动的机构。在图 4.11 中,两个杆伸长达到几乎共

线的位置,在驱动一侧施加很小的力,在被动一侧就会产生很大的力。

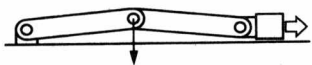


图 4.11 由小力产生大力的肘式机构

3. 凸轮机构

想要产生任意位置、速度的往复运动,最简单的办法就是设计凸轮机构。如图 4.12 所示,有外凸轮、沟槽凸轮、圆柱凸轮等。在外凸轮中,滚子(凸轮从动件)沿单方向转动,实现高速、平滑驱动。不过,为了提高从动件的高速跟踪性,需要较大的弹簧力,而且从动一侧的保持力(刚性)也要利用弹簧。槽形凸轮、圆柱凸轮能够提高从动侧的刚性。但是,为了使滚子在沟槽中平滑地移动就需要留出间隙,所以输出中会产生回差。

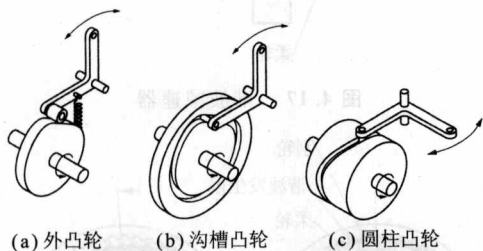
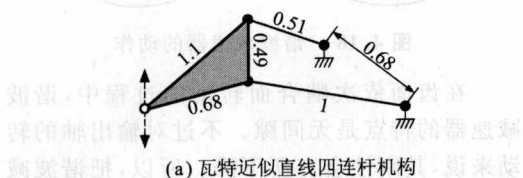
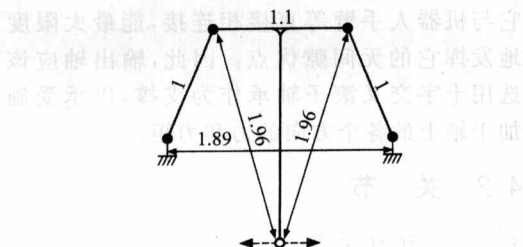


图 4.12 凸轮机构



(a) 瓦特近似直线四连杆机构



(c) 罗伯特近似直线四连杆机构

4. 用连杆机构生成直线运动

下面举几个机构的例子,说明不使用滑块机构也能生成直线运动。四连杆机构中就有近似生成直线的机构。取它末端轨迹在行程中间的部分能够近似出一条直线来,但是在两端部分则偏离直线比较严重。若改用六杆以上的连杆,则可以生成更精确的直线运动。图 4.13 是生成近似直线连杆机构的典型例子,图 4.14 是生成精密直线连杆机构的典型例子^[5]。

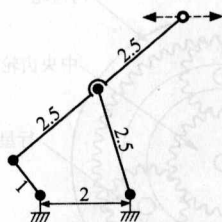
5. 齿轮与连杆组合机构

把齿轮传动与连杆机构进行组合,可以构成许多有用的运动生成机构。例如,在图 4.15 中,通过齿轮传递改变第二根连杆的角度,就可以把第一根连杆的连续旋转运动变换为第二根连杆末端的往复直线运动。

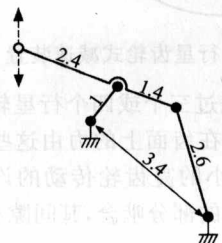
4.1.6 特殊减速机构

1. 行星齿轮式减速机构

如图 4.16 所示,在中央齿轮(太阳轮)的周围布置三个或四个行星轮,通过一个内齿轮组合的系统叫做行星齿轮。即使是同一个齿轮,根据输入与输出齿轮的选择可以获得不同的减速比。通常,把太阳轮作为输入,将内齿轮固定,行星轮作为输出,但也有把行星齿轮固定,内齿轮作为输出的情形。

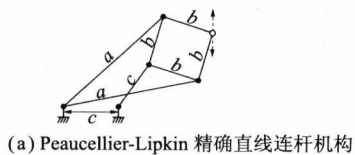


(b) 切比雪夫近似直线四连杆机构

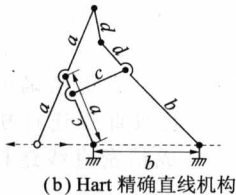


(d) 爱波斯近似直线四连杆机构

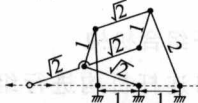
图 4.13 近似直线生成机构



(a) Peaucellier-Lipkin 精确直线连杆机构



(b) Hart 精确直线机构



(c) Bricard 精确直线连杆机构

图 4.14 精确直线生成机构

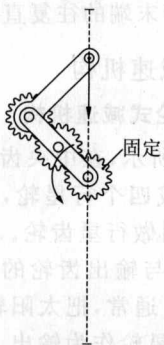


图 4.15 齿轮与连杆组合的直线运动生成机构

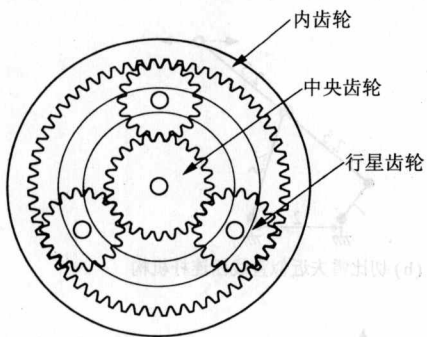


图 4.16 行星齿轮式减速装置

行星齿轮是通过三个或四个行星轮进行啮合,啮合点多,施加在齿面上的力由这些齿轮分别负担,比同样大小的直齿轮传动的许用力矩大。由于是大直径的部分啮合,其间隙小^[6]。

2. 谐波减速器

如图 4.17 所示,由谐波发生器(椭圆形)、柔轮(在柔性材料上切制齿形)以及与它

们啮合的刚轮构成的传动机构叫做谐波减速器。柔轮的齿数比刚轮的齿数少两个齿。如图 4.18 所示,谐波发生器转动,柔轮与刚轮的齿依次啮合,从转过相同齿数的中心角来说,柔轮比刚轮大,于是柔轮相对于刚轮沿着波发生器的反方向作微小的转动。例如,齿数为 100 的刚轮与齿数为 98 的柔轮组合,每一周会产生 $2/100$ 的转动差。由此得到大的减速比。

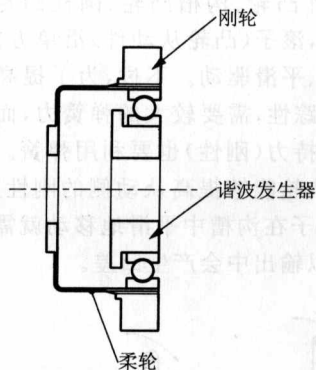


图 4.17 谐波减速器

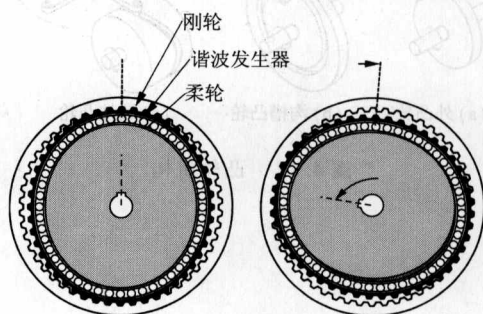


图 4.18 谐波减速器的动作

在齿面依次啮合而转动的过程中,谐波减速器的特点是无间隙。不过对输出轴的转动来说,其刚性会有所下降。所以,把谐波减速器的输出部分安排在输出的最后一级,让它与机器人手臂等直接相连接,能最大限度地发挥它的无间隙优点。因此,输出轴应该选用十字交叉滚子轴承作为支撑,以承受施加于轴上的各个方向的力和力矩。

4.2 关节

4.2.1 转动关节

1. 滚动轴承

典型的滚动轴承有如图 4.19 所示的几

种类型,如球轴承(ball bearing)、滚子轴承(roller bearing)等^[7]。

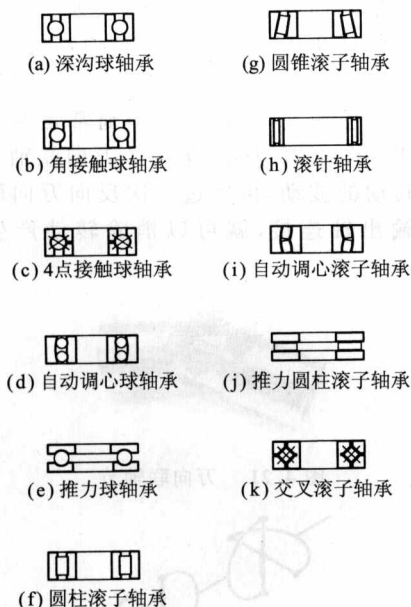


图 4.19 滚动轴承

1) 深沟球轴承

深沟球轴承是最普通的滚动轴承。除了能承受径向载荷外,它还能承受一定程度的轴向载荷。载荷的大小主要由滚珠的直径和数目决定,滚珠的直径越大,内外直径之差就越大,宽度越大,承载能力就越大。该轴承也有外圈带法兰的、带C型环用的沟槽等形式。

如果轴承的内径小于10mm,则称之为微型轴承。此外,机器人机构还广泛地应用JIS标准以外的超薄剖面的大直径滚动轴承。

2) 角接触球轴承

这种轴承的外圈与内圈沟槽内外不对称,只能沿一个方向承受大的轴向力。为了承受双向轴向力,需要两个轴承成对使用。

3) 四点接触球轴承

通常来说,深沟球轴承内外圈的沟槽曲率比滚珠的直径稍稍大一些,因此滚珠与内外圈在沟槽的底部进行接触。与之不同,四点接触球轴承减小了沟槽底部的曲率,结果使滚珠与沟槽的两侧接触,即意味着每一个滚珠与内外圈共计有四个接触点。由于轴承事先进行了预紧,即使受到倾斜于转轴方向的力作用,也不会发生晃动,甚至单个轴承也能承受一定程度的力矩载荷。

4) 自动调心球轴承

外圈沟槽制作成球面,这样的结构设计既允许围绕轴的旋转,也允许有改变轴的方向的旋转运动。因此,即使轴承外圈的支撑部分与轴之间并不那么精确地垂直,仍然可以良好地起到支撑作用。例如,在不同的两处通过滚动轴承支撑同一根轴,如果使用通常的滚动轴承,就要求两处支撑部分的相对位置和角度具有很高的精度;反之,如果改成自动调心球轴承,就允许有某种程度上的差异。如果是大型机械,两个轴承采用装配结构,不固定在同一个基座上,这时自动调心球轴承会非常有效。

5) 推力球轴承

属于滚珠夹在两个圆板之间滚动的结构,这种轴承能够承受轴向的推力。根据圆板中有无沟槽,推力轴承的结构有两种类型。如果是无沟槽,径向必须依靠其他轴承来支持。在使用上,推力滚珠轴承的两片圆板中的一片应该与轴一起转动,另一片应该与轴分离独立旋转。为此,一片圆板的内径为公称直径,另一片的内径稍微大一些。与径向轴承相同,滚珠的直径越大,承载能力越好。

6) 圆柱滚子轴承

圆柱滚子轴承比球轴承的径向承载能力大。

7) 圆锥滚子轴承

圆锥滚子轴承里面有带锥面的滚子,它们通常是两个相对使用,承受大的径向和轴向载荷。通过两个轴承之间的预紧,可以实现无间隙的精密支撑,它可以用于机床主轴等。

8) 滚针轴承

内有针状滚子的轴承叫做滚针轴承,它的内外径之差非常小,厚度很薄。有时候为了进一步减薄,还特别卸去内圈,让滚针直接与轴颈接触。

9) 自动调心滚子轴承

轴承外圈带有球面沟槽,因此即使轴的方向相对于外圈并不严格垂直,也能有一定的安装容让性。滚子多呈鼓形,通常多排使用。

10) 推力圆柱滚子轴承

具有两个圆板之间夹着滚子滚动结构的推力轴承,虽然厚度比较薄,但是载荷的承受力大。

11) 交叉滚子轴承

圆柱滚子彼此相差 90° 构成的滚动轴承, 它的特点是径向承载和轴向承载能力都很大, 单独使用时可以承受力矩载荷。它的内圈或外圈有一侧采取分离结构, 因此当需要实施过盈配合的时候, 通常把过盈安排在非组合的部分。

12) 滚动轴承的载荷和寿命

滚动轴承的额定载荷有基本额定静载荷和基本额定动载荷两种。基本额定静载荷一般对应于滚子弹簧极限变形的最大量为 0.01% 时的载荷, 超过这个值就可能产生塑性变形。另外, 基本额定动载荷是实际轴承工作 100 万转之后不发生破坏所对应的载荷。设计时, 如果要求轴承的寿命超过 100 万转, 那么对应于基本额定动载荷, 其设计载荷应该适当减小。这时, 寿命 L 就为

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^n \times 100 \text{ (万转)}$$

式中, C 为基本额定动载荷; P 为实际载荷; $n=3$ (球轴承), $n=10/3$ (滚子轴承)。

2. 滑动轴承

与滚动轴承相比较, 滑动轴承的摩擦转动阻力比较大, 但是它面压力升高, 允许支撑很大的径向载荷。其实, 如果有很好的润滑条件, 它比滚动轴承的寿命会更长。至于润滑的方法, 例如, 有动压轴承 (利用轴转动在油膜中产生压力的原理来设计轴承结构) 和静压轴承 (借助于外部压力源向轴承供给油压)。另外, 还有由多孔轴承材料做成的含油轴承, 它能保存润滑油。还有一种干轴承, 只需涂抹二硫化钼涂层, 在无润滑油状态下也能减小摩擦。

如果滑动轴承需要有调心功能, 可以如图 4.20 所示, 把轴承外周做成球面, 而允许在轴偏转的方向上对应于支撑部分发生。这样, 对两个轴承之间的相对位置精度的要求就可以放宽, 例如, 用于小型电机等。

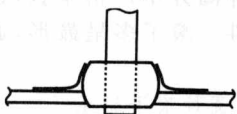


图 4.20 滑动轴承的自动调心安装

3. 万向联轴节

图 4.21 所示的是能够沿两个方向进行

弯曲的关节, 它主要用于把动力轴的转动传递到多少有些角度偏离的轴上去。这时如果使用单个万向联轴节, 那么输入轴的转角与输出轴的转角不一致。也就是说, 输入平滑恒定的转动, 输出反而会发生波动。所以, 为了防止产生波动, 万向联轴节通常是两个配对使用。图 4.22 表示, 第一个万向联轴节引起轴转动的波动, 再经过一次反向万向联轴节与输出轴连接, 就可以消除转动产生的波动。

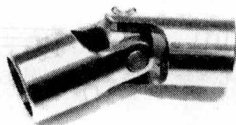


图 4.21 万向联轴节

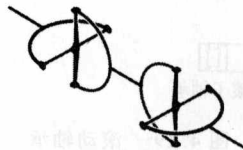


图 4.22 能等速传递转动的两个万向联轴节的连接

4. 球关节

图 4.23 是可以实现三个方向转动的关节, 即球关节。从结构上看, 它无法避免摩擦, 所以仅限于较小的尺寸。球关节的缺点是在弯折的两个方向上其可动范围 (角度) 通常比较小, 为 30° 左右。

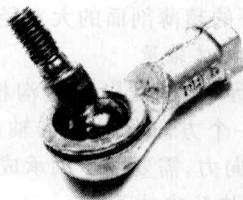


图 4.23 球关节

4.2.2 移动关节^[3,4]

移动关节可以支撑很大的载荷, 沿直线产生精确的直线运动。例如, 机床刀架的移动、虎钳钳口的移动等, 因为都要承受很大的力, 所以采用移动关节。机器人大多使用摩擦很小的滚动直线移动关节。主要的有下列四种。其中, 如果滚珠或滚子能够循环, 那么

行程就有限制。反之,如果无滚珠循环结构,行程就比较短,不过摩擦小,运动平稳。另外,滚珠花键和滚珠衬套只支撑在轴端,如果轴比较长,而且承受横向载荷,那么需要考虑轴的弯曲变形。但是,如果在特殊的导轨轨身材料上安装直线轴承和交叉滚子导轨,那么这种结构就能承受大的横向力作用,不必担心轨道的弯曲问题。

1. 直线滚动轴承(直线导轨)

图 4.24 在轨道和滑座之间通过球的滚动来支撑平滑的直线运动,在滑座内部需要设计出滚珠循环的路径。图 4.24(a)的形状能够承受大的压缩载荷,但抗拉能力比较弱;图 4.24(b)的形状能够承受各个方向的大载荷。至于力矩载荷,单个滑座能承受的载荷较小,必要时可以将两个滑座连接起来共同承受力矩载荷。

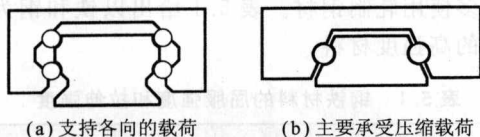


图 4.24 直线滚动轴承(直线导轨)

2. 交叉滚子直线导轨

在图 4.25 中,轨道与滑座都有 V 字形的沟槽,它们之间嵌入圆柱形滚子来支撑直线运动。滚子由保持架支持,不进行循环,因此它的行程受到限制。由于滚子呈现线接触,故可以支持大的载荷。

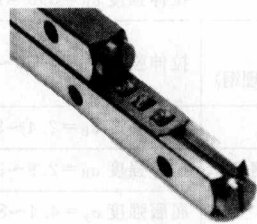


图 4.25 交叉滚子直线导轨

3. 滚珠花键

如图 4.26 所示,这种轴承在轴和螺母之间通过滚珠的滚动来支持直线运动。在轴上加工出能让滚珠滚动的沟槽或突起棱,在螺母内加工出滚珠循环轨道。这种轴承在围绕轴旋转的方向上单个螺母所能承受的力矩载

荷很大,相反在其他方向上却很弱。所以,如果需要承受围绕轴旋转方向以外的大载荷,可以使用两个螺母。

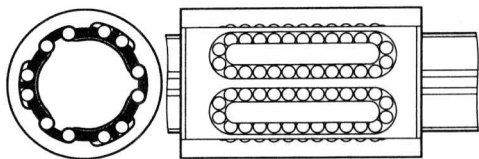


图 4.26 滚珠花键

4. 滚珠衬套

图 4.27 的轴承在圆形轴和螺母之间借助于滚珠的滚动结构来支撑直线运动。图 4.27(a)的结构表示滚珠在螺母的内部循环,它对行程没有限制。在这个结构中滚珠只沿轴向滚动,不围绕轴线转动。由于它的轴上没有沟槽,因此不能支持绕轴旋转的力矩。另一种结构如图 4.27(b)所示,滚珠靠保持架支持,可以沿轴向和圆周方向滚动,可以实现移动和转动的复合运动。这种结构由于滚珠不循环,所以阻力特别小。但是滚珠的运动受到轴向行程的限制,这是由于滚珠只能在螺母内部往复运动的缘故。

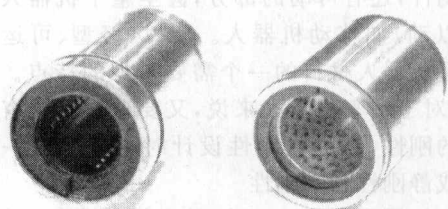


图 4.27 滚珠衬套

图 4.27 滚珠衬套

参考文献

1. 机构
- [1] 教育歯車工業 KG STOCK GEARS カタログ (2000)
- [2] 小原歯車工業 総合カタログ (1999)
- [3] THK 直動システムカタログ (1991)
- [4] NSK 精機製品カタログ (1994)
- [5] Ivan I. Artobolevsky: Mechanisms in Modern Engineering Design, Volume 1~III, MIR Publishers, Moscow (1975)
- [6] 米田, 坪内, 大隅: はじめてのロボット創造設計, 講談社 (2001)
- [7] NTN 転がり軸受入門ハンドブック (1998)

第5章 材 料

5.1 机器人材料^[1]

5.1.1 机器人自身材料的特性

材料的概念具有使用的目的,应该从机器人本身的任务出发选择那些能够满足所需功能的材料,然后加以制作和装配。机器人材料必须能满足机器人设计和制作的要求,选材时应该充分考虑它的特性,应该对机器人有充分的了解。也就是说,在掌握机器人的特性、各个要素的具体要求之后再选择适合的材料。

机器人结构材料用来支撑、连接、固定机器人的各个部分,当然也包括机器人的运动部分,这一点与一般的机械结构没有区别,机器人自身所用的材料也就是结构材料。但是,机器人自身不仅仅是单纯的、固定不动的构件,还有可动的部分,甚至整个机器人都可以动,如移动机器人。所以,轻型、可运动性是机器人材料的一个需要考虑的特点。不过,对于精密机器人来说,又要求材料具有一定的刚性,在进行刚性设计时可以再进一步分成静刚性和动刚性

机器人属于一种伺服机构,机器人材料的一个特性是它的动作是受控的。这就意味着对机器人材料应该加上一条“受控性”的概念。材料的“受控性”与一般机械材料所具有的“结构性(保持形态)”、“轻质性(被运动性)”和“可加工性”属于同等重要的指标。材料的“可加工性”是指为了满足机器人零部件的功能,将材料加工成给定形态的难易程度,有时进行加工确实很困难,因此这是一个很重要的指标。

现在,机器人进入了与人类共存的阶段,其中人们特别看好家用和娱乐机器人,对结构材料的要求已经从传统机械的高刚性向更加注重柔性转变,甚至连机器人的外观都从金属的硬、冷的感觉向柔和、温暖转变。因此,机器人本体结构材料正在变得柔和、轻

软、温和,触感和色泽等使人感到舒服和美观。这就是后面将要叙述的感性材料。

5.1.2 结构材料

1. 高强度材料

机器人本体材料应该具有良好的结构性。所谓材料的结构性是指在载荷作用下不变形和不被破坏的性质。满足这些特性的材料被称为高强度材料,它们具备强度和韧性的综合特性。典型的高强度材料首先当数钢铁材料。钢铁材料可以分为钢和铸铁,现在大多使用轧制钢材。表 5.1 给出以铁和钢为主的高强度材料。

表 5.1 钢铁材料的屈服强度和拉伸强度

钢的种类	
高纯度纯铁	屈服点强度 $\sigma_y = \sim 30\text{MPa}$
微量碳素固熔铁	$\sim 150\text{MPa}$
纯铁	$\sim 200\text{MPa}$
低碳钢	拉伸强度 $\sigma_B = 290 \sim 440\text{MPa}$
非调质高强度钢	拉伸强度 $\sigma_B = 490 \sim 590\text{MPa}$
调质高强度钢	拉伸强度 $\sigma_B = 590 \sim 1200\text{MPa}$
高强度钢	拉伸强度 $\sigma_B = 590 \sim 1200\text{MPa}$
超高强度钢 (马氏体时效处理钢)	拉伸强度 $\sigma_B = 1.50 \sim 3.9\text{GPa}$
形变热处理钢	拉伸强度 $\sigma_B = 2.4 \sim 3.9\text{GPa}$
钢琴线(冷拔钢丝)	拉伸强度 $\sigma_B = 2.9 \sim 3.9\text{GPa}$
铁的金属须	屈服强度 $\sigma_y = 4.4 \sim 8.8\text{GPa}$
理想强度	屈服强度 $\sigma_y = \sim 20\text{GPa}$

目前,人们正在开发多种高强度材料。特别是用高强度钢代替普通碳素钢更是受到关注。表 5.1 所示的高强度合金钢及超高强度合金钢等很可能会成为将来机器人的结构材料。可是,从表面上看,强度与韧性是相互矛盾的,高强度钢存在如何提高韧性的问题。同时,这些高强度钢的轻质化也十分重要。

2. 环境强度与材料

所谓环境强度,是指材料具有耐腐蚀性、耐磨性和耐热性,它是描述材料抵御使用环境所引起的破坏和损伤的能力。虽然不能一概而论,一般来说材料硬度大其耐磨性就好。磨损分成干式和湿式两种,通过润滑可以提高耐磨性。生锈、氧化、材料对药品的抵抗性分别称为耐腐蚀性、抗氧化性、耐药品性。腐蚀往往起源于电化学反应。靠不锈钢、钛合金、铝、铬等形成的钝化膜可以防止腐蚀,不易离子化的贵金属的耐腐蚀性较好,将它们用贵金属进行表面处理后,能收到提高环境强度的效果。此外,还有陶瓷、有机涂料喷涂等方法。耐热性材料指对高温环境的承受力,即耐氧化性和耐高温的强度。塑料的耐热性比较差,使用时应该给予充分注意。此外,在低于室温的低温环境里可能会产生低温脆化的问题。

3. 材料的可加工性

材料需要根据使用目的加工成适当的形状。可加工性属于材料的一种特性,由加工技术呈现出这种特性。即材料的加工特性体现在它的切削性、铸造性、可塑性、焊接性等方面。在选择材料时,若不充分考虑影响加工性的各种因素,不仅无法制造出优质的机器人,而且还容易产生缺陷。材料的可加工性与加工技术息息相关,它依赖于加工技术的发展。所以,谈加工性不要光从材料的材质方面考虑,也要注意加工技术本身的发展。

5.1.3 轻质材料^[2~8]

机器人是运动的,而且运动又是被控制的,所以它必须采用轻质材料。

1. 轻合金

相对密度小于5的金属材料均属于轻合金。典型的轻合金有镁、铝、钛合金等。为了提高强度,在纯铝中添加了铜以及其他增强合金的元素再经过时效热处理析出,形成高强度的硬铝。普通硬铝的强度约为400MPa,相当于一般钢铁的水平,超强度硬铝的强度约为500MPa,而超高强度硬铝的强度约为600MPa。

最近,锂-铝轻合金被开发出来,它的刚性很高。结构用轻金属镁合金也随着铸造技术的发展而被实用化,它可用于机器人的结构材料。这种合金的密度为1.74g/cm³,强度达到200~250MPa,比强度很大。钛系合金的轻合金也很重要,钛的强度可以和铁匹敌,密度仅为铁的60%。它还能进行热处理,经过与钢相同的热处理,可以达到1000~1200MPa的强度。但是,钛系合金的加工性差。材料的轻质性涉及比强度、比刚性的概念,它们的定义是:比强度=强度/密度,比刚性=刚性/密度。比刚性将在后面进行详细讲述。

2. 低密度材料

由密度定义可知,组成材料的原子质量小,而且原子排列距离大,则它的密度小。前一种情况是,一般来说,原子序号小,原子的质量就轻。例如,由C、H和O等原子组成的塑料的密度很小,而且塑料是非结晶体,其原子和分子的排列比较稀疏,因此使其密度更小。如前所述,尽管原子结构之间的高分子链结合强度很高,但是分子彼此之间的结合是靠范德华结合,它的强度很低,所以从整体上看塑料的强度不如金属。人们后来开发的工程塑料克服了这一缺点(表5.2^[5])

表5.2 各种工程塑料的特性^[5]

特 性		尼龙6 PA6	聚碳酸酯 PC	聚缩醛 POM	聚对苯二甲 酸乙二酯 PET	聚对苯二甲 酸丁二酯 PBT	聚苯醚树脂 变性 PRO*
1	相对密度	1.13	1.20	1.41	1.37	1.31	1.06
2	拉伸弹性系数/MPa	755~3138	2403	2815	2059	2157~2452	2452
3	延伸率/%	300	110	60~75	200	300	60
4	拉伸强度/MPa	69	59	61	72	55	67
5	压缩强度屈服点/MPa	46~89	86	110	99	89	113

续表 5.2

特 性		尼龙 6 PA6	聚碳酸酯 PC	聚缩醛 POM	聚对苯二甲 酸乙二酯 PET	聚对苯二酸 丁二酯 PBT	聚苯醚树脂 变性 PRO*
6	弯曲强度/MPa	—	93	89	115	97	93
7	冲击强度(悬臂梁式)/(J/m)	53	637	85	43	39~64	245
8	硬度(洛氏)	HRR97	HRM63	HRM78	HRM95	HRM68	HRM78
9	比热容/[kJ/(kg·K)]	1.67	1.17	1.47	1.17	1.42~2.05	1.34
10	热变形温度/°C (弯曲应力 1.82MPa)	68	132	110	85	54	130
11	吸水率/%24h	1.3~1.9	0.15	0.25	—	0.08	0.07
12	热传导率/[W/(m·K)]	0.24	0.19	0.23	0.29	0.23	0.21
特 性		聚砜 PSF	聚苯硫 醚化物 PPS	聚芳酯 PAR	聚苯醚砜 PES	液晶聚合物 LCP	ASTM 试验法
1	相对密度	1.24	1.64	1.21	1.37	1.40**	D1505
2	拉伸弹性系数/MPa	2452	7747	1937	2354	9807	D638
3	延伸率/%	50~100	1.0~1.3	50	40~80	3.0	D638
4	拉伸强度/MPa	71	118	70	84	206	D695
5	压缩强度屈服点/MPa	98	167	94	—	—	D695
6	弯曲强度/MPa	108	196	90	129	174	D790
7	冲击强度(悬臂梁式)/(J/m)	59	69	373	—	431	D256
8	硬度(洛氏)	HRM96	HRR122	HRR123	HRR120	HRM60	D785
9	比热容/[kJ/(kg·K)]	1.30	—	—	—	—	—
10	热变形温度/°C (弯曲应力 1.82MPa)	175	260	175	203	180	D648
11	吸水率/%24h	0.30	0.02	0.25	0.43	0.08	D570
12	热传导率/[W/(m·K)]	—	0.28	—	0.17	—	C177

* 是与耐冲击聚苯乙烯(HIPS)混合后的 PRO。

** 用 D792 来测定。

3. 多孔材料^[6]

从形式上看,小密度的多孔材料也属于轻质材料。例如,陶瓷就容易制成多孔材料。在塑料中则有泡沫塑料,引人注目的是最近开发出了金属泡沫材料,轻质泡沫铝就是其中一例,多孔材料主要用在吸收振动、隔热和其他方面。

4. 高强度轻质材料^[7]

由轻质性能指标——比强度公式可知,增大分子的材料强度也能提高比强度。因此,高强度材料与轻质低密度材料同样属于轻质材料。如前所述,钢材由于具有强度和

韧性经常用于结构材料,此外也已经提炼出超强度合金钢,它们的强度更高。目前主要还是在空间技术、航空工业中采用这种材料,今后机器人材料的轻质化也会考虑选用这种材料的(表 5.1)。

5.1.4 复合材料

由两种以上的材料组合为一种材料叫做复合材料。其目的是,利用组分材料的特性、混合形态、混合比、分布的改变,充分体现两者组合的效果,以提高材料的性能。由于复合材料毕竟属于机械混合的层面,因此效果不会有明显的提高。制作复合材料时,总是

以某一个材料作为基材,再把其他必须附加的材料做成特殊形态,通过机械形式混合到基材中构成。把基材叫做母体或母相,所添加的分散材料叫做分散相。

可以根据分散相的形态对复合材料加以分类,大致可以划分为粒子分散相、纤维分散相。后者又可以细分为①连续纤维;②不连续纤维。随着纤维长度的取向不同,附加分散纤维材料构成的复合体的性质也不一样,这样就体现出复合材料的各向异性特征。人们还经常把一张复合材料板叠合起来作为多层复合材料使用,也有人把包层材料算作复合材料。上述复合材料复合化所造成的材料物理性质的变化,大致与母相和添加分散相之间的混合比成比例关系。

1. 纤维增强复合材料^[8]

塑料密度低,具有质量轻的优点,但是强度不足,比强度不高。如果把陶瓷等增强硬质材料添加到塑料中,就可以克服这个强度不足的缺点,生产出纤维增强塑料(FRP)。表5.3中列举了一些纤维增强塑料的例子^[8]。

2. 高级复合材料

如果纤维材料或线材料比块状(massive)材料强度高,且纤维直径小,那么复合材料的强度将接近于理想强度,即相当于构成结晶的原子之间结合力的强度。这个理想强度是

实际材料的数十倍到数百倍。

目前,具有高强度的碳纤维或陶瓷纤维的复合材料受到人们的关注。于是出现了以软质金属为母相代替塑料母相的增强纤维复合材料(FRM)。或许这些高级复合材料将成为机器人自身的结构材料。表5.4是轻质材料与其他的材料的比较。

3. 粒子分散复合材料

这种材料的分散相呈粒子态,有时也有人工切片的薄片状分散相,例如,粒子充填的塑料、粒子充填的金属等,一般都以增强为目的。材料复合的目的是增强耐蚀性、耐磨性、耐热性、绝缘性、隔音性、光学特性等效果。因此,粒子分散型适合任何复合材料。

这时,如果把功能性分散材料或包层材料用于结构体的母相,就能够增加母体的功能性。例如,把智能材料——形状记忆合金纤维分散到母体里进行复合,就做成了随环境变形和移动的结构复合材料。一般把跟踪环境状况的各种传感器材料作为分散材料,将其复合到母体结构材料中,就产生了能够捕捉来自外部的信息,并相应产生身体运动与动作的复合智能结构材料,这样的材料可用于机器人。

这样的智能分散材料复合化之后得到的

表 5.3 各种纤维增强材料的强度

纤维/母相	纤维体积 含有率	密 度 (g/cm ³)	拉伸强 度/MPa	纵向弹性 系数/GPa	备 注
无机纤维/有机母相					
玻璃/不饱和聚乙烯	0.5	2.0	750~1000	38	E-玻璃单向增强材料
碳/环氧	0.6	1.57	2700	158	T800/3631 单向增强材料
有机纤维/无机母相					
芳香尼龙纤维/环氧	0.6	1.38	1400		单向增强材料
无机纤维/有机母相					
碳/黏合剂	0.02		30		短纤维增强材料
碳化硅/碳化硅	0.4	2.3	230	140	平纤维增强材料
无机纤维/金属相					
氧化铝/铝	0.5	2.9	860	150	单向增强材料
增强水晶/金属母相					
氧化铝/铝	0.2		310	95	SiCw/6061
碳化硅/铝	0.2	2.8	520~850	110~120	SiCw/7075
CVD纤维/金属母相					
硼酸/铝	0.5	—	1300~1400	220~230	B/6061-T6

智能结构材料将是机器人结构材料。机器人的结构材料本来就应该就是智能复合结构材料,它类似于生物结构,能用来捕捉外部环境信息,经过处理后能产生最适合的动作。这样的智能复合结构材料,尤其将它作为制作拟人机器人的手臂及腿的结构材料最为理想。

表 5.4 轻质材料的比较

	密度 ρ / (g/cm^3)	弹性模量 E/GPa	拉伸强度 σ_B/MPa
FRP	1.6	17	250
GFRP	2.0	44	1200
CFRP(单方向增强)	1.5	130	1500
SiCFRP	2.3	100	1100
CFRM	2.3	145	1030~1080
BFRM(M: Al)	2.9	227	1500
Ti	4.5	103	300~600
Ti-Al 合金	4.5	108	780~1030
Ti-Mn 合金	4.5	103	1000
普通硬铝	2.8	70	400
超硬铝	2.8	70	500
超高硬铝	2.8	70	630
低碳钢	7.9	210	400
Cr-Mo 钢	7.9	210	900
高强度 C 纤维 ($\phi 7\mu\text{m}$)	1.75	250	2700
B 纤维 ($\phi 7\mu\text{m}$)	2.60	400	3300
间羟胺纤维 29 ($\phi 12\mu\text{m}$)	1.44	62	2700
开普勒-49($\phi 12\mu\text{m}$)	1.45	130	2700

5.1.5 刚性材料

在衡量机器人自身材料的性能指标中,刚性至关重要。刚性与下式的弹簧系数 k 有关,即

$$k = P/\delta$$

式中, P 为载荷; δ 为变形量。

若材料的刚性指数 k 由截面二次惯性距为 I 及材料的弹性模量 E 表示,那么对于简单梁来说有 $k \propto IE$ 。由式可知,刚性问题就是材料的弹性问题。高刚性材料就是高弹性材料。材料的弹性表示结构的不敏感性质,它是由组成材料的原子结合力所决定。如果添加的合金元素量比较小,那么母相的弹性仍将起决定性的作用,合金整体的弹性系数不会有太大的变化。

但是,由于结构很敏感性的原因,材料的强度在合金化之后可能会导致巨大的变化。我们知道,硬铝在合金化和热处理之后强度得到极大提高,但是它的母相与纯铝基本相同,因此其弹性系数变化不大。这说明硬铝的刚性几乎没有改进。这个性质在所有增强复合材料中表现的都一样。一般来说,密度小的材料,熔点也低,它的弹性系数也就小^[7](表 5.5)。即低密度轻质材料一般来说刚性都不高。不过,碳纤维、硼纤维等的强度和弹性系数都大。它们就是后面要介绍的高弹性-高强度材料。

表 5.5 材料的弹性模量、熔点、密度的关系^[7,13~17]

材料名称	弹性模量 E/GPa	熔点/ K	密度 ρ / (g/cm^3)
Be	300	1553	1.82
Mg	440	923	1.74
Al	71	923	2.7
Ti	103	1943	4.54
Fe	210	1812	7.87
CO	210	1753	8.90
Ni	193	1728	8.90
Cu	110	1359	8.96
Mo	329	2898	10.2
W	407	3673	19.3
碳素钢	210	1423~1730*	7.87~7.83
合金钢	210	—*	—
灰口铁	105	1423~1623*	7.81
硬铝	70	约 923	2.8
钛合金	110	约 1873	4.5
氧化铝	360	2323	3.15
氧化铝金属须	420	2323	3.19
碳化硅金属须	400~700	2875	3.18
低密度聚乙烯	0.098~0.027	383~410	0.91~0.925
中密度聚乙烯	0.176~0.38		0.926~0.940
高密度聚乙烯	0.422~1.265		0.941~0.965
尼龙 6	2.46~3.16	488~505	1.12~1.17
尼龙 66	1.23~2.92	528	1.13~1.15
丙烯	2.46~3.52	>437	1.17~1.20
氯乙烯(硬质)	2.45~4.22	490	1.35~1.45
高弹性碳纤维	350~750	>3275	1.85
硼纤维	400	2573	2.63

* 合金的熔点根据掺杂元素的量而变化,但在有限范围内弹性模量变化不大。另外,高分子的弹性模量和熔点与分子量和结晶程度有关。对于纤维来说,其弹性模量取值有范围。

注意观察表 5.5 可知,除金属之外,特别是塑料,即使是同一种成分,它们的熔点、密度等也受到相对分子质量和结晶度的影响。

金属的弹性系数和熔点等对结构是不敏感的。陶瓷、高分子材料等塑料由于存在材质的不均匀性,也显示出类似于强度的结构敏感性。

如果将机器人视为一种精密机械来考虑,那么应该按照高刚性原则来进行设计,即最好是高弹性材料。但是,有时人们又要求机器人具备“柔性”,实现“温和”的动作,此时应将两者综合起来实现最优的设计。今后,“柔性”材料,如橡胶、塑料和泡沫材料等可望受到重视。仅仅具有高刚性材料的金属材料可能会淡出应用的舞台。弹性有两类:一类是服从胡克定律的普通金属的弹性能量;另一类是橡胶或超弹性金属这样的熵弹性,当然还有表现出黏弹性行为的材料,它的弹性变形随载荷的加大而变大,但不成比例关系。可以考虑使用这些柔性材料实现柔和的动作。生物体物质中呈现这样的柔和行为的例子很多。

5.1.6 抗振材料^[9,10]

如果载荷出现振动,那么此时必须考虑

动刚性。机器人的振动控制也是一个大问题,它与伺服机构的稳定性有关。在振动问题,或者说在伺服机构二次滞后的响应方程式中,惯性项就代表材料的质量,与材料的轻质性有关,而刚性项与材料的弹性有关。发生振动时,动刚性 k 、质量 m 与振动系统的固有频率 f 之间存在如下关系:

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$

由这个关系式可见,动刚性 k 和质量 m 是振动控制非常重要的因素。式中的制动项或者说黏性项相当于振动的衰减项,以材料因子的形式给出系统内部的衰减特性。与非金属材料相比,金属材料的振动衰减性能很差,两者之间有量级上的差别。既然金属材料的衰减性能很差,防振合金应运而生。表 5.6 给出抗振合金的例子,是按内耗机理进行分类的^[10]。表 5.6 所列的复合材料是把振动衰减性好的塑料夹在钢板中间制成的。除了材料的衰减之外,振动衰减问题还涉及整体结构,即系统的衰减性,它与结构零部件之间的库仑衰减有关,比材料内部的衰减大得多。

表 5.6 抗振合金^[10]

分 类	名 称	组 成	衰减系数/实效 温度	拉伸强 度/MPa	振动衰减机理
复合 相型	片状石墨铸铁	3.5C-2.5Si	20%/~150°C	150	第二相的黏性 流动
	Zn-Al	78Zn-22Al	30%/100°C	260	
强磁 性型	纯 铁		15%	200	磁壁的非可逆 移动产生的电磁- 机械的延滞
	安定合金	Fe-0.1C-12Cr-1Al		400	
	无声合金	Fe-12Cr-2Al	35%/~380°C	410	
	轻柔合金	Fe-12Cr-2Al-3Mo		440	
	NIVCO-10	Co-22Ni-2Ti-0.5Al			
位错型	SERENA	Fe-2.5Al-0.6Si		340	位错从固定点 脱离产生的延滞
	纯 镁		60%	70	
	KIXI	Mg-0.6Zr	60%	170	
双晶型	Mg-Mg ₂ Ni	Mg-5.8-19Ni		200	伴随热弹性马 氏体的变态双晶 边界、母相和马氏 体相边界的移动 造成的延滞
	索诺斯同(Sonoston)	54Mn-37Cu-4Al-3Fe-2Ni	40%	530	
	因克拉谬特(Incramate)-I	Cu-45Mn-2Al	20%/~70°C	530	
	因克拉谬特(Incramate)-II	Cu-45Mn-2Al-2Sn	/~120°C		
	proteus	Cu-17Zn-5Al			
	镍钛合金	50Ni-50Ti	35%/~100°C	510	
	Cu-Al-Ni	Cu-14Al-4Ni			

5.1.7 变形功能材料

1. 橡胶, 人造橡胶

橡胶具有高达1000%的巨大的伸长弹性变形能, 热可塑性人造橡胶常温下具有与含硫橡胶同样的特性。这种弹性变形不服从金属那样的胡克定律, 即载荷与变形量成正比, 而是产生所谓的熵弹性的巨大变形。与之相反, 金属弹性等属于弹性能。机械结构的设计主要考虑高刚性, 但是在进行柔性结构设计时, 使用这些产生大弹性变形的橡胶和金属等复合材料能够实现最佳柔性结构。

橡胶中有天然橡胶(NR)和人工橡胶, 各自的特性也不同。人工橡胶中有聚丁烯系合成橡胶(BR)、乙烯橡胶(SBR)、乙戊二烯橡胶(IR)、丁烯类橡胶(IIR)、硝基系的合成橡胶(NBR)、氯丁橡胶(CR)、硅橡胶(Si)氟橡胶(FPM)等, 这些橡胶特性各异。橡胶除了变形功能以外, 也被用于前述的抗振、密封或包装。

2. 超弹性材料

形状记忆合金与金属的弹性能不同, 能达到后者的数倍到数十倍的熵弹性大变形。形状记忆合金有钛镍合金、铜-锌合金等。这些合金强度大, 而且抗振性好。

3. 超塑性变形

有一类材料展示出明显的加速蠕变变形行为, 因而需要采用新的加工技术。具有代表性的超塑性合金有微细结晶粒超塑性合金和变态超塑性合金。前者包括铝-锌系合金, 最近又开发了微细结晶粒钛合金等。在变形速度与温度得到最佳组合的条件下, 让微细结晶粒合金变形可以观察到超塑性流动变形的现象, 而在变态温度下让变态超塑合金变形同样能观察到超塑性流动变形的现象。微细结晶粒合金具有抗振性。在难加工的陶瓷等脆性材料中也可以看到超塑性现象, 不过变形量不大, 是普通合金的百分之几十, 它可以进行类似金属塑性变形程度的加工。

5.1.8 其他材料

1. 生物材料

寻找复合材料的根源, 其实都是来自于自然材料和生物材料。由井所著《复合材料

入门》(工业调查会)的第3章列举了自然中的复合材料, 如木材、竹、天然纤维、骨、齿、贝壳、天然珍珠等, 并说明了它们的复合结构。至于生物材料, 如动物生物材料的毛皮、皮革等也可以用作机器人材料。随着这些自然材料应用的展开, 现在最新科学技术已经能够生产人工仿生材料了, 它们在市场上被广泛出售。机器人的结构材料应该涵盖自然材料、生物材料及仿生材料。笔者就提议应该在假肢材料中使用活性生物材料^[11]。最近, 人们特别呼吁用再生医学组织培养出的生物材料代替传统无生命物质构成的工业材料, 这种想法也说明采用活体生物材料充当机器人结构材料的时代已经到来。

也就是说, 我们不应该把与人类日渐共存的家庭机器人、护理机器人、医疗机器人、服务机器人, 仍然视为机器的延续, 仍将其归于加工机器人; 相反, 它们应该具有与人类相似的触感。这样一来, 生物材料在机器人结构中的重要性就显得日益突出。生物体的自然复合结构兼有合适的刚性和强度, 是最优的材料。这种设计不是仅仅着眼于高刚性-高强度, 而是模仿自然生物结构的最优刚性-强度设计, 它扩大了材料的选择范围, 给予机器人设计以更大的空间。由井所著作《复合材料入门》在第3章进一步总结指出: “自然创造的复合材料是具有头脑的智能材料^[12]”。这个自然智能复合材料, 或者生物材料的仿生人工材料都可以用于结构材料。这个观点是前述倡议采用人工复合智能材料的基础。

2. 钢丝, 纤维

钢丝和纤维材料比块状材料的强度大得多, 软钢丝就是普通的铁丝, 直径为7~1.8mm, 拉伸强度达400~1200MPa, 经过热处理加工的硬钢丝直径为0.08mm, 其强度达到2500MPa。直径0.08mm的钢琴丝, 其强度达3000~3500MPa, 有的能达到4000MPa。

至于纤维, 则涉及前面所述的复合材料的纤维分散相的情况。不过此处的分散相与复合材料中增强母相的纤维的作用不同, 而是在材料发展的过程中以纤维本身为主体所达到的高强度-高弹性材料。这些高强度-高弹性纤维受到人们的关注, 被称为超级纤

维^[13~17]。特别是高分子系纤维或碳纤维,它们密度低,自身很轻,比强度和比刚性都非常大。超级纤维的特性在表 5.7 中给出^[13~17]。表 5.7 也给出了接近理想强度的物质须晶的数据。

表 5.7 超级纤维的种类^[13~17]

纤维的种类	直径/ μm	拉伸强度/MPa	弹性模量 E/GMPa
钨纤维	13	300~410	345~407
钼纤维	25	220	329
钢纤维	13	280~400	200
钛纤维	—	170	103
铝纤维	—	62	71
形状记忆合金纤维	50	1100~1500	105
碳化硅纤维	10~20	2400~3500	170~200
低弹性系数碳纤维	7~14	500~1000	30~44
高弹性系数碳纤维	6~10	1900~2000	350~750
高强度碳纤维	7	2500~5600	200~300
芳香尼龙纤维 29	12	2800~3600	60~130
凯夫拉尔纤维 49	12	2700~3620	124~131
凯夫拉尔 149		3440	172~179
E-玻璃纤维	10	1900~3800	72~76~87
S-玻璃纤维	10	3590~4140	71~85
硼纤维	50~100	3300~3700	400
氧化铝纤维	20	390	380
纯铁晶须	2~10	13 000~15 200	210
氧化铝晶须	—		420
碳化硅晶须	0.5~0.7	3000~21 000	400~700

3. 感性材料^[18]

家用机器人或宠物机器人与人类有密切的接触。一件很重要的事情就是对它们进行装饰,以便能给人一个良好的形象。它们的外装饰材料如涂料,服饰衣装则可以考虑毛皮、皮革等材料。这些材料以往被人们所忽视,也就是所谓的感性材料。

4. 卫生和安全性

家用机器人、娱乐机器人等与人类密切共存,组成机器人的材料不应该对人类造成危害。例如,不能出现毒性或卫生不合格的材料。不仅是毒性,甚至连产生副作用的材料也不允许使用。当然,当机器人与人类发生物理上的接触时,导致不愉快的感觉,对人类有危害的凶器等都应该一概避免。在日常生活中,除了注意防止上述问题之外,还必须制定出不可预测的事故、灾害、危险发生时的安全对策。以机械危险为例,在机器人被损

坏时需要防止碎片的散射,例如,采用韧性材料或吸收冲击的材料,避免出现如同玻璃飞溅那样极端的情况。另外,还必须考虑难燃性、耐火性、常温或高温下都不挥发有害物质等各种要求。总之,与人类共存的机器人必须和家具材料以及幼儿玩具材料一样,同样地考虑它对人的安全性。

5.1.9 结束语

在前几节中按照性能要求把机器人本体材料分成:①结构性;②轻质性;③刚性;④衰减性;⑤加工性;⑥受控性等六大类,并且说明在与人类紧密共存的机器人材料中⑦安全-卫生因素是另一个重要的因素。这些因素是互相关联、彼此制约的。材料的各种特性往往彼此矛盾,所以应该按照具体情况作出最佳的选择。

近年来出现了质量轻、高强度的机器人结构材料——镁合金,高级纤维复合材料也十分引人注目。它是一种柔性的、轻质的、高强度的、高刚性的材料。机器人材料的概念已经超越了机械材料那种块状、高刚性的传统理念,转而向各向异性的生体结构材料发展,即在某一个方向上具有高刚性、高强度,而在其余方向上是柔软、舒适的结构材料。

机器人材料并不指单纯的原材料,应该从设计的观点加以合适的选择。设计一材料—加工应该建立起三位一体的关系,改变材料,加工方法也需要随之进行改变,并建立与此对应的新的设计理念。材料的进化带来结构形态的进步,材料领域技术发展的历史与航空器领域的发展历史如出一辙。

井口信洋

5.2 传感器材料

5.2.1 金属材料

传感器使用的金属材料可以分成以下三种:

(1) 功能性材料 承担传感器的转换功能,有时兼有驱动功能。

(2) 结构辅助材料 发挥功能性材料功能的机构或传感器结构所需的材料。

(3) 机构和辅助两用材料

上述材料因用途的不同有板材、线材、箔、细线、粉状、糊状、电镀等多种形式,功能

材料与使用形态之间有着密切的关系。

例如,对银(Ag)来说,有导体(板、线)、催化剂、离子电极、糊状厚膜、导电糊、触点材料、电极材料等多种用途和形态,为了满足各种用途可进行高纯度提炼或加入添加剂,再进行必要的加工、热处理和表面处理等。严格地说,尽管金属材料具有均质性,但随着用途和使用方法的不同也会呈现出不同的特性。

最近,非晶态合金、金属超微粒子等材料陆续问世,它们具有新的特性和形态,有望在传感器材料方面得到应用。例如,非晶态合金的耐腐蚀性和磁性已经得到了应用,尤其是它的磁性,非晶态磁性体在安全传感器、平面位置传感器、旋转传感器、磁场传感器、电流传感器、位移传感器、节流传感器、压力传感器、氦液面传感器、磁头等方面已经被实用化。各种研究报道指出,集成有非晶态传感器的系统具有极佳的性能。非晶态合金还可以做成薄带、纤维、粉末、薄膜和镀膜等多种形状,为传感器提供了更大的选择余地。在非晶态合金的成分中,Co系成分的FeCo、CrNb、SiB得到广泛的应用,用于做成薄带、纤维、粉末等形状,磁致伸缩量可达到为零。在高磁致伸的Fe系中,FeSiB大量被用于安全传感器。此外,非磁性的NiSiB用在压力传感器和汽车传感器上^[1]。

从20世纪70年代人们开始注意到当给强磁性材料施加磁场时所产生的磁致伸缩现象可以用于传感器材料,后来陆续开发出铁系合金、镍-钴基合金等高性能的磁致伸缩材料。其后,又发现稀土类元素R与跃迁金属M的金属化合物RM₂有 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ 大小的超磁致伸缩现象,最近又发现了SmFe系^[2]、TbFe系^[3]、Ni₂MnGa系化合物也有这种现象^[4]。超磁致伸缩现象的应变比电致伸缩的应变量大得多,所以它们不仅能用于传感器材料,而且可用于驱动器。

向夹住1~2nm的薄绝缘层的两片强磁性金属层之间通电流,发现电流依存于强磁性金属的磁化矢量的相对角度,称此现象为通道效应。因此而产生的磁阻叫做通道磁阻(TMR; Tunnel Magneto-Resistance)。所以,这种材料有望在下一代高密度磁头材料中得到应用^[5]。其中有Fe/Al₂O₃/Fe结合型和Co-Al-O粒状型,据报道结合型在TMR中占

40%以上,而后者随着温度的下降,在TMR中的应用急剧增多,其特点是不依赖于偏压。

金、银等金属的超微粒子所具有的催化作用特别引人注目。此外,形状记忆合金、金属氧化物等材料也在不断开拓新的应用领域。不过,尽管新金属材料在传感器方面的应用领域在不断深化和扩大,但传统金属材料的应用仍然占居主导地位。

表5.8中给出了组成传感器的重要金属材料——电阻材料、导体材料、触点材料等的综合资料^[6]。

表5.8 传感器用金属材料

功能分类	金属材料	应用(传感器, 传感器元件)
电阻材料		
测温电阻材料	Pt, Cu, Ni, W (细线、盒、薄膜)	温度传感器、流速传感器
应变电阻材料	Ni, 锰铜合金, 康铜, 阿范斯康铜, 镍铬V, Pt-Ir合金	应变片、力传感器
强磁性磁阻材料	高磁导铁镍合金, Ni-Co合金(薄膜)	磁场传感器、磁泡传感器
导电材料		
导体材料	Cu, Al, Ag, Au, Pt, Ni, Ti, Ta, W(线、板、薄膜、印制导体等)	仪器和磁芯的线圈、导线、压电体/半导体/感应体的电极
触点材料	Ag, Ag合金, Cu-Pd合金, Rh, Ru	簧簧继电器、微动开关、双金属、温度开关
超导材料	Pb, Nb	SQUID、高灵敏度磁通计、心磁计、红外线和微波检查
电化学/物理化学电极	Pt, Ag, Pd, Hg, 不锈钢	pH计、ZrO ₂ 氧传感器、酶传感器
热电偶材料		
热电偶	Pt-13Rh/Pt, Pt-10Rh/Pt, 铬镍-铝镍, Cu-康铜, 铬镍-康铜, Fe-康铜, Pt-30Rh/Pt-6Rh, Ir/Ir-40Rh, W-5Re /W-26Re, 铬镍/Au-Fe 0.07	热电偶温度传感器、热电保护继电器、功率表、传热式真空计

续表 5.8

功能分类	金属材料	应用(传感器, 传感器元件)
补偿导线	Cu-2Ni, Cu, Cu-30Ni	
磁性材料		
软磁性材料	78.5Ni 高磁导铁镍合金(PA) 45~50Ni 高磁导铁镍合金(PB) Mo-高磁导铁镍合金(PC)	继电器、磁屏蔽 继电器 磁头、高灵敏度继电器、磁屏蔽
半硬磁性材料	49Co-2~5V-bal Fe	常闭式继电器、笛簧开关
维甘德线	10V-52Co-38Fe, 50Ni-50Fe	磁性旋转传感器
永久磁铁(硬磁性材料)	铝钴钕永磁合金系, 稀土类——钴系(Sm-Co)	话筒、振动传感器、可动线圈仪器、拾音器
感温磁性材料		
整磁合金	Mo-高磁导铁镍合金, 蒙乃尔合金, 热压层塑料	仪器磁铁(磁通温度补偿)
磁性相转移合金	Fe-Ni-Co-Si 系	温度继电器
电致伸缩材料	硅钢, Ni, 高磁导铁镍合金	力传感器、感磁性光纤
弹性材料	Cu-Ni-Mn, Cu-Be, Ni-SpanC, SUS316	压力计受压膜、受压膜盒、弹簧管
低膨胀材料	殷钢	双金属、恒温器
形状记忆材料	Ni-Ti, Cu-Al-Zn, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn 等	恒温器球管、常温断路器
耐腐蚀材料	各种不锈钢, 蒙乃尔合金, 青铜	节流孔、涡轮机、文丘里管
耐热材料	不锈钢, 耐盐酸镍基合金, 因科镍合金	热电偶涂料
封口材料	42 合金, 46 合金, 52 合金, 426 合金, 科瓦铁镍钴合金, 无氧 Cu	传感器外壳
催化剂材料	Pt, Pb, Ag, Ni	气体传感器
储氢材料	LiNi ₅ H _{6~7} , FeTiH _{1.5~1.95} , VH _{1~2} , NbH _{1~2} , Mg ₂ NiH ₈	氢气恒温器

5.2.2 半导体材料

半导体材料在传感器方面的应用始于 20 世纪后半期, 主要的光电材料有 Ag_2S 等的硫化物、 ZnO 等的氧化物和 ZnSe 等的硒化物用于显像管中的光电材料; 同时也以真空镀膜技术为中心开展电子照片感光材料的研究。另外, 在金属半导体中, 可以举出 Ge、Si、Se 和 Te 用于光传感器、磁传感器、温度传感器, 最近也开始用于压力传感器。随着 Si 半导体理论的建立和发展, pn 结技术、微细加工技术、表面处理技术、电极形成—组装技术等迅速发展, 促进了半导体材料在光电二极管、光电三极管, 以及最新的二维阵列固体摄像元件、医用 FET 传感器、车载压力传感器等方面的广泛应用。

非晶态半导体材料的研究主要集中在以 Ag_2S 为主的 Si 材料方面, 它们大多数用在光传感器和太阳能电池上。非晶态 Si(a-Si) 的特点是具有比结晶材料更廉价的生产成本, 图 5.1 给出一个 a-Si 光传感器的例子。

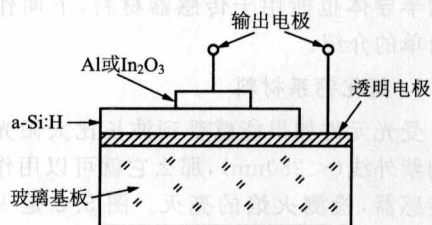


图 5.1 三明治型 a-Si 光传感器的基本结构

半导体材料在传感器中的应用主要以光传感器为主。首先在光电效应型材料中有可见光的 Sb_2S_3 真空镀膜、 PbO 真空镀膜等, 它们是制作摄像管的目标光电平面的材料, 应用于光导摄像管和氧化铅光电摄像管等。此外, 在红外线中使用 $\text{PbO-Sb}_2\text{S}_3$ 真空镀膜、在紫外线中使用 Se 系及 As_2S_3 等的非晶态真空镀膜等。

光电元件用于可视光的主要优点体现在 CdS 粉末的烧结工艺比较简单, 现在已经实用化了。在红外线中, PbS 多结晶真空镀膜元件用于小于 $3\mu\text{m}$ 的短波长, InSb 单结晶元件用于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波长, 而 $(\text{Hg-Cd})\text{Te}$ 三元系混晶系元件用于更长的波长。

光电效应型元件使用经过 pn 结技术处理的非均匀巴尔可镍铁合金。最常用的材料是 Si 结晶,其中有从紫外线区域到近红外线区域的宽带域光电二极管、光电三极管,具有快速响应特性的 pn 型和离子雪崩型的各种光电二极管,以及作为一维及二维阵列光电传感器被人们所熟知的 MOS、CCD 固体摄像元件等。

在磁传感器用到的半导体中,InSb 真空镀膜、GaAs、Si 用于霍尔效应型材料中。如果应用在 GaAs 的场合,需要注入 Si^+ 或 Ge^+ ,产生浅活性层,增大空穴的密度。如果使用 Si,那么就是利用它易于 IC 化的特点。另外,InSb、InAsBi 等则用于磁阻效应型材料中。

在压力传感器中,无论是压电半导体材料,还是压阻效应型材料都是以 Si 为主,它们的生产均需要扩散技术和蚀刻技术,最近的发展趋势是将温度补偿电路和特性补偿电路做成 IC 与传感器集成制造。

除上述的 Ge、Si、GaAs 以外,还有研究报道指出半导体材料中的氮化物、碳化物等化合物半导体也能用于传感器材料,下面作一些简单的介绍。

1. 氮化钙系材料

受光元件如果能感受到波长比太阳光谱短的紫外线($<280\text{nm}$),那么它就可以用作火焰传感器,检测火焰的亮灭。图 5.2 是火焰发光谱。在 350nm 处,太阳光光谱的强度基本为零,火焰特有的紫外线发光则位于更短的波长一侧。传感器(以下称火焰传感器)就是根据这个紫外线的有无来检测火焰的亮灭。火焰传感器中有热电偶、火焰离子检测器、光电管等。在这些火焰传感器中,光电管检测紫外线的性能最佳,问题是它的寿命比较短。再加上周边电路的成本较高,不适合应用于民品,一般都被用于工业加热炉等大型燃烧装置。

若将其改成 GaN 系半导体,既允许在高温下工作,又能制作量子效果明显的受光元件,因此有可能提供小型简便的火灾探知系统^[7]。火灾传感器的要领是:①能对 pW/cm^2 左右级别的低照射强度紫外线做出响应;②不对太阳光产生响应。为了解决这些问题所采取的措施是:改善 GaN 系材料的结晶性和组

分的控制技术,降低暗电流,研发位于 280nm 附近有急剧吸收带边缘的受光元件等。

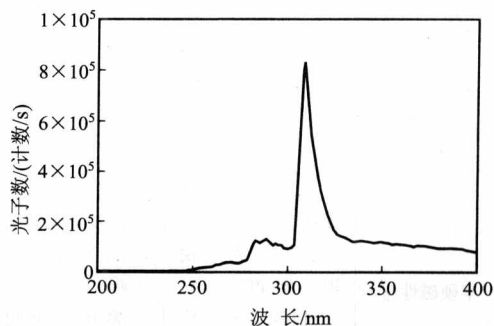


图 5.2 火灾发光光谱

2. 金刚石系材料

金刚石是一种宽禁带的半导体($E_g \sim 5.5\text{eV}$),并且具有优良的机械特性、热传递性、光学特性、耐环境性,这些都是其他材料所不及的极限物理性质。因此,人们尝试利用这些特性制作了各种各样的传感器。

金刚石的吸收带边缘位于波长 225nm 附近,因此可以考虑采用 pn 结等的光电型和光传导型材料充当紫外线型传感器。不过,目前的技术很难得到 n 型材料,所以主要以光导型材料为主。例如,曾经有过这样的报道,在单结晶金刚石和多结晶 CVD 金刚石膜上制作条带状结构,当照射红外线时,发现光电流的波长、光量及偏压之间存在一定的关系^[8]。

与传统材料 Si 相比,金刚石材料不易受放射性的损伤,是一种宽带间隔半导体,即使在高温下也可以始终保持良好的分辨率特性,因此其有望用于高能量的耐环境放射性传感器。

金刚石除了是一种禁带宽度很大的半导体以外,还有望成为高热传导性热电偶。例如,在 Si 等的基片上堆积 p 型单晶—多晶 CVD 金刚石膜,用这种膜制作热电偶,此时既可以利用掺杂剂对电阻值和温度变化率(它们是实际应用上很重要的特性)控制进行调节,又可以借助于蚀刻等工艺生成任意形状的模版。现在已经确认,它们从室温到 1000°C 的温度范围的热响应高达数微秒^[9]。其原因源于金刚石的热敏性质,在短时间内即可达到热平衡状态,因此它有望作为高速、高精度温度传感器。

给半导体材料施加压力,让结晶产生应变,就会引起电阻值变化量的减少,这一现象叫做压电效应。人们已经依据这个特性尝试制作了金刚石压力传感器。应变片的特性指标一般用应变率,如果是 p 型均相外延 CVD 膜,它在室温下可以得到 550 以上的应变率值^[10]。

有研究报告称,如果对 p 型多结晶 CVD 膜片型元件中硼的掺杂剂量或膜质进行控制,电阻的变化量与载荷基本成线性变化,在室温下应变率可以达到 1000,在加热至 200℃ 时仍可以维持 700 以上的应变率^[11](图 5.3)。

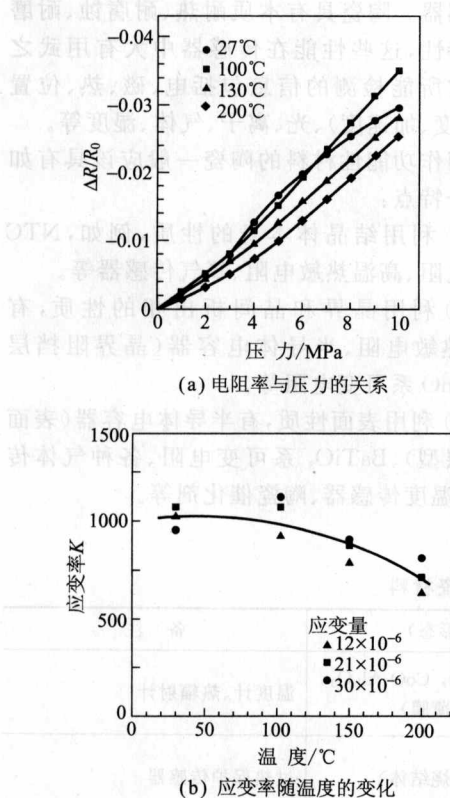


图 5.3 金刚石压力传感器的压力-温度关系

3. 碳化硅系材料

SiC 的禁带宽度随合成形式而异,为 2.2~3.3eV,与金刚石、GaN 等都可以算作禁带宽度较大的一类半导体。由于其有望用于高频、大电流、高速、高温的应用场合,因此人们正在快速推进对它们的研究。已经开发的装置有 MOSEFT、MESFET、光电二极管等,应用事例有高温薄膜热敏电阻等^[14]。推进这样的研究开发有两个背景:一个背景是优质

大单晶的制作已经成功;另一个背景是利用 CVD 法制作外延生长膜的技术被攻克,因此有理由认为下一代的半导体装置中碳化硅系材料将进一步发挥它的重要作用。

5.2.3 有机材料

近年来,人们了解到有机材料也可以用于制作传感器,其中最实用和最有希望用作传感器的是高分子材料。它的特点是容易形成膜和纤维状,这种形式被认为是便于传感器材料利用的。

表 5.9 是按照功能分类的用于传感器的有机材料^[13]。通常,有机传感器材料所能响应的刺激分成两种:物理刺激和化学刺激(化学物质作用)。如果材料在这些刺激下能发生电气特性(电气变换)的变化,那么它就有望用于传感器材料。当然,电气变换之外的刺激响应也能用在传感器材料上。下面主要对具有电气功能的有机材料进行介绍。

表 5.9 主要的有机传感器材料

功 能		主要材料
电子功能	强感应性(压电性、热电性)	PVDF, PZT-高分子复合材料
	半导体性、导电性	TCNQ 系络合物, 聚乙炔, 导电聚吡咯高分子固体电解质
	光电性	PVK
分子识别功能	离子识别功能	环状肽、王冠醚、聚醚
	低分子有机物识别功能	发酵酸、微生物、结合蛋白质
	高分子识别功能	抗体
	玻璃透过功能	高分子膜
其他功能	透过率、反射/透过光波长的温度变化	液晶
	电光学的散射	液晶
	稀释引起的物理性质的变化	尼龙、亲水性高分子

展示压电效应的高分子中,除了 PVDF(聚氟乙烯)之外,还有聚丙烯腈、丙烯腈、丙烯酸等。

在 PVDF 的单体单位($-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$)中,氢原子和氟原子之间电负性的差别很大,具有大的双极子矩。PVDF 虽然属于结晶性高分子,但是如果在常压下熔融结晶,能析出

无极性的 α 形结晶。把 α 形结晶拉伸、热处理、加压,转移为 β 形结晶。如果同时施加电压,由于双极子彼此汇聚而获得大的压电性合强感应性,于是就可以将其作为压电传感器材料使用了。

电光效应对发挥有机传感器材料的功能,例如,EL(电发光)、电分光、电光散射等来说是至关重要的。其中,后两者具有液晶表现出来的电场感应功能。聚集状态下的液晶结构分为向列相、层状相、胆甾醇相三种。液晶特有的性质可以应用于多种传感器。举液晶与电场传感器相关的应用领域为例,基于液晶的电光效应可以制作传感器,来检测IC针孔处或绝缘不良处的缺陷^[14]。有人还尝试让负液晶在LSI基板上按垂直方向完成异向感应性取向,由于当电流流过时导体的泄漏电磁场对液晶分子有取向效应,通过可视图像就可以区分出电流流过的部分、无电流流过的部分,以及电流异常流动的部分等。有机材料中的电着色就是利用电化学反应使颜色产生变化,具有代表性的是有机材料紫精(viologen)系色素。

电阻在受光照射后发生变化也是可以利用的现象。例如,基于有机半导体光电效应的例子有聚乙烯咪唑+激活系材料,基于热电效应的例子有PVDF、TGS,而基于偏光效应的例子有PVA/I₂。有机半导体具有与

陶瓷半导体同样的温度-电阻特性(NTC)。把钠四氰基对醌二甲烷等分散在可塑性聚氯乙烯或聚氨酯中制成的有机材料可以充当塑料热敏电阻材料。人们正在探讨将石墨-石蜡-聚乙烯混合物充当正温度系数的PTC热敏电阻材料的可能性。

5.2.4 无机材料

典型的无机材料——陶瓷在传感器中的应用研究进展很快。实际上,随着材料科学的发展,越来越多的非金属无机物质得以应用,发挥着各自的优越性能。其中不少被用于传感器。陶瓷具有本质耐热、耐腐蚀、耐磨损等特性,这些性能在传感器中大有用武之地。它所能检测的信息包括电、磁、热、位置(含速度、加速度)、光、离子、气体、湿度等。

用作功能性材料的陶瓷一般应该具有如下三个特点:

① 利用结晶体本身的性质,例如,NTC热敏电阻、高温热敏电阻、氧气传感器等。

② 利用晶界和晶间析出相的性质,有PTC热敏电阻、半导体电容器(晶界阻挡层型)、ZnO系可变电阻等。

③ 利用表面性质,有半导体电容器(表面阻挡层型)、BaTiO₃系可变电阻、各种气体传感器、温度传感器、陶瓷催化剂等。

表 5.10 传感器用陶瓷材料

	出力	效应		材料(形态)	备注
		载体浓度	(NTC)		
温度传感器	电阻变化	温度变化	(PTC)	NiO, FeO, CoO, CoO-Al ₂ O ₃ , SiC(块状、厚膜、薄膜)	温度计、热辐射计
				半导体 BaTiO ₃ (烧结体)	过热保护传感器
		半导体-金属相转移		VO ₂ , V ₂ O ₃	温度开关
	磁性变化	铁磁性-常磁性转移		Mn-Zn 铁淦氧	温度开关
位置速度传感器	反射波波形变化	压电效应		PZT, 钛酸锆酸铅	鱼群探测器, 探伤仪、血流计
光传感器	电动势	热电效应		LiNbO ₃ , LaTaO ₃ , PZT, SrTiO ₃	红外线检测
	可见光	荧光		ZnS(Cu, Al), Y ₂ O ₂ S(Eu)	彩色电视机阴极射线管
				ZnS(Cu, Al)	X射线监视器
		热荧光		CaF ₂	热荧光计

续表 5.10

气体传感器	电阻变化	可燃性气体、接触燃烧反应热	Pt 催化剂/氧化铝/Pt 线	可燃性气体浓度计、报警器
		氧化半导体吸(排)气体产生的电荷移动	SnO_2 , ZnO , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $-\text{LaNiO}_3$ (La, Sr) CoO_3 等	气体报警器
		氧化物半导体的化学量变化	TiO_2 , CoO-MgO	汽车排气传感器
湿度传感器	电阻	高温固体电解质氧浓淡电池	稳定氧化锆($\text{ZrO}_2\text{-CaO}$, $-\text{MgO}$, $-\text{Y}_2\text{O}_3$, $-\text{La}_2\text{O}_3$ 等)氧化钍(ThO_2 , $-\text{Y}_2\text{O}_3$)	排气传感器(λ 传感器)、钢水溶存氧气分析仪、CO/缺氧/不完全燃烧传感器
		吸湿离子传导	LiCl , P_2O_3 , $\text{ZnO-Li}_2\text{O}$	湿度计
	感应系数	氧化物半导体	TiO_2 , NiFe_2O_4 , MgCr_2O_4 + TiO_2 , ZnO , Ni 铁淦氧, Fe_3O_4 胶体	湿度计
离子传感器	电动势	吸湿改变感应率	Al_2O_3	湿度计
		固体电介质浓淡电池	AgX , LaF_3 , Ag_2S , 玻璃薄膜, CdS , AgI	离子浓淡传感器
	电阻	栅极吸附效应 MOSFET	Si(栅极材料 H^+ 用: Si_3N_4 / SiO_2 , S_2 -用: Ag_2S , X-用: AgX , PbO)	离子敏感性 FET(IS FET)

利用上述性质开发的传感器用陶瓷材料很多,表 5.10 列举了其中的一部分^[15]。实际上,制作出从细密质地直至多孔质地的陶瓷材料十分简单,只要控制好烧结条件就行。对于陶瓷来说,由两种以上的不同材料混合生成固溶体型组织,或者由两相以上的不同结晶相生成组织混合均匀的组织都是可能的。这种特性对于单晶材料来说既无法实现,也无法得到。

多数陶瓷传感器都着眼于开发细密质地陶瓷的容积物理特性,因为这样做能把电磁感应材料、磁性材料或半导体材料各自所固有的特性发挥到接近于单晶材料的程度。利用这些晶粒本身的物理特性制作了各种实用化的陶瓷传感器,例如,基于半导体性、感应性、磁性的温度传感器,基于热电效应的红外线传感器,基于压电效应的超声波传感器等。

也有一些质地细密的陶瓷材料的功能元件,它们利用晶界附近的容积表面层的物理性质,而不是利用容积特性。例如,正特性(PTC)热敏电阻,利用温度急剧变化导致电阻的变化,而非线性电阻体则利用电压变化

时电流产生急剧变化,它们都是基于烧结过程中产生的快速晶界扩散现象,扩散或析出杂质后在半导体容积表面层内部形成结合层得到的。

至于多孔质陶瓷,水蒸气或气体能够通过陶瓷中的气孔向材料内部进行扩散,并吸附在强晶表面上。尤其是半导体陶瓷,其性能与表面层状态的关系极大。它们中的大多数在吸收了湿度或吸附了气体之后,导电率都会发生显著变化。可以认为,具有晶粒、晶界、表面气孔等结构特征的陶瓷适合充当气体或湿度等周围环境传感器的材料。

虽然电磁传感器未被纳入表 5.10 的传感器用陶瓷材料中,但最近以 $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{MnO}_3$ ($\text{A}=\text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}; \text{B}=\text{Sr}, \text{Ba}, \text{Ca}$) 为代表的钙碳矿氧化物及其同族物质作为磁阻效应材料的开发成果十分令人注目。上述明显负磁阻效应的发现有望用于新一代磁头或超高密度磁传感器等电子元件,激发了研究者的开发欲望^[16]。

随磁场的不同电阻值出现明显变化的材料中最高的能达到 7 位以上,人们把这种超

巨大磁阻效应称为 CMR (Colossal Magneto-Resistance)。之所以起这个名字,是因为通过人工晶格等观察到所谓的 GMR (Giant Magneto-Resistance) 效应,这个 MR 值是惊人的。图 5.4 给出 $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$ 系材料的磁阻效应。

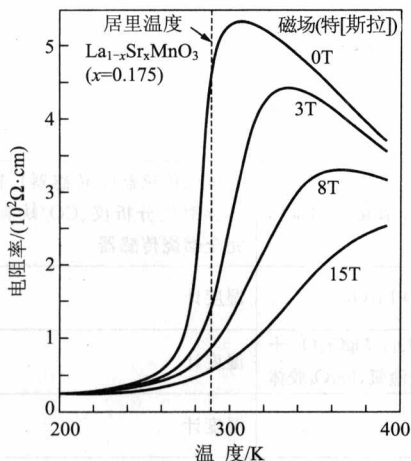


图 5.4 $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$ 结晶的电阻率随温度和磁场变化的关系

最近已经发现,当光照射到上述材料上时,它们的电阻率将发生变化,人们期待它们将来在光磁铁(磁性随光而改变)等特殊应用中发挥作用^[17]。

5.2.5 复合材料

复合材料(CM)大体上分为结合系和生成系两类^[18]。如图 5.5(a)所示,结合系在复合前后,组成成分在材质、成分比例、形态方面几乎不发生变化;生成系在复合前后,上述三个方面均发生相当大的变化。目前,已经实用化的复合材料大多数属于结合系,至于生成系的应用事例,如图 5.5(b)所示,仅限于几种单向凝固合金。结合系复合材料由基材和分散材料(增强剂)组成,命名的方法很多,但是一般按基材命名。本节以压电复合材料、导电高分子材料、倾斜组成材料为例加以说明。前两者以有机材料为基材,与无机材料复合后产生兼有两种材料优点的优质材料,而后者把不同的组分加以倾斜化,以提高红外传感器的性能。

1. 压电复合材料^[19]

最初的压电复合材料是用压电陶瓷粉末(PZT 粉末)和高分子材料等做成的软质压电

体,向高分子材料中混入氟化橡胶(聚氟乙烯叉、六氟丙烯、四氟乙烯聚合物)后可以改善压电特性,利用这种材料已经开发出压电硬盘。PZT 粉末和氯丁橡胶复合在一起制成了压电橡胶,它被用在压电导线型水下话筒、音乐拾音器、超声波声场传感器等场合。

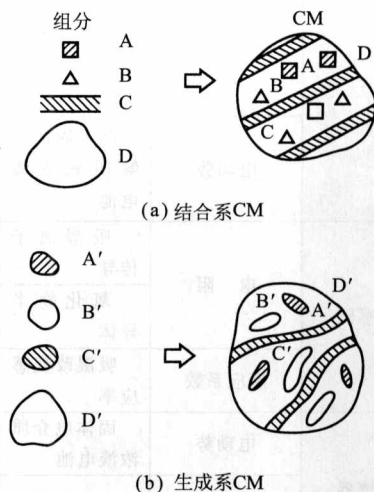


图 5.5 复合材料的分类

2. 导电高分子复合材料

导电高分子复合材料中的大多数为导电橡胶,它们大部分属于硅橡胶和炭黑或硅橡胶和银晶粒系材料。此外,它们还可以应用在电磁波屏蔽材料、高压输电电缆绝缘覆盖层、导电纤维增强塑料等场合。在导电橡胶中还有一种加压导电橡胶,它与一般的导电性橡胶不同,加压时只有受压局部表现出导电性。这种特殊导电橡胶在加压和释压时电阻值的差别超过 $1 \times 10^6 \Omega$,所以它可用在各种压力传感器上。

3. 倾斜组成材料

从严格的意义上讲,倾斜组成材料不算作复合材料,不过目前正有人在尝试将容积组分倾斜化来达到改善传感器温度特性的目的。在这里,举一个改善热电系数和温度特性的例子^[20],其措施就是通过 $(\text{BaSr})\text{TiO}_3$ 系使组成成分倾斜化,期望让 $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ (以下简称“BST”)在接近室温附近时具有热电系数的峰值,于是选择 BST35、BST37.5、BST40、BST42.5,把这四个组分重组成型,再通过热处理制作成倾斜试料。倾斜试料的热电系数如图 5.6 所示。由图 5.6 可知,它与单

个组分的试料相比变小了,并且在 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 内有非常稳定的值。也就是说,这个倾斜试料发挥了稳定性能的作用。

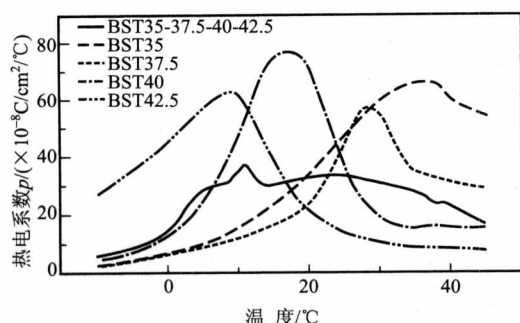


图 5.6 在 1kV/mm 电场下 BST35-37.5-40-42.5 的热电系数随温度变化的关系

一瀬 升

参考文献

5.1 机器人材料

- [1] 井口信洋：ロボット学会誌, Vol.4, No.4 (1986) pp.417-422; 機械の研究, Vol.38, No.12 (1986), pp.1377-1382
- [2] 井口信洋：第 508 回講習会＝軽量化設計のための機械材料教材 (1980.5)
- [3] 林毅編：軽量構造の理論とその応用, 上下, 日本科学技術連盟 (1967)
- [4] 井口信洋：機械の研究, Vol.38, No.3 (1986) pp.435-440
- [5] 日本材料学会編：改定機械材料学, 日本材料学会 (2000), p.335
- [6] 塩谷茂夫：化学と工業, Vol.25, No.11 (1972) pp.778-781
- [7] 井口信洋：機械の研究, Vol.38, No.3 (1986) pp.435-440
- [8] 日本材料学会編：機械材料学, 日本材料学会 (2000) p.348
- [9] 井口信洋：機械の研究, Vol.38, No.11 (1986) pp.1273-1280
- [10] 日本材料学会編：機械材料学 (2000) p.323
- [11] 井口信洋：リハビリテーション・エンジニアリング Vol.17, No.1 (2002) pp.16-18
- [12] 福田武人, 北出真太郎：材料, Vol.46, No.6 (1997) pp.696-702; 日本金属学会：金属便覧 (2000) pp.800-804
- [13] 篠原明ほか：ニューファイバサイエンス, 培風館 (1990) pp.184-189
- [14] シーエムシー出版部編：コンポジット材料の製造と応用, シーエムシー (2000) p.102
- [15] 中島章夫, 碓義人編：ハイテク高分子材料, アグネ (1986) p.57
- [16] 日本材料学会編：改定機械材料学, 日本材料学会 (2000) p.132, p.335, p.347
- [17] 日本複合材料学会編：プラスチック基複合材料を知

る辞典, アグネ (1986) p.32, pp.123-126

- [18] 井口信洋：金属, アグネ (1994.4) p.914

5.2 传感器材料

- [1] 毛利佳年雄：アモルファス磁性体の開発とセンサ応用動向, センサ技術, Vol.7, No.1 (1987) pp.103-110
- [2] T. Honda, Y. Hayashi, K. I. Arai, K. Ishiyama and M. Yamauchi：Magnetostriction of sputtered Sm-Fe thin films, IEEE Trans. Magn., Vol.29 (1993) pp.3126-3128
- [3] A. E. Clark and H. S. Belson：Giant room-temperature magnetostrictions in TbFe_2 and DyFe_2 , Phys. Rev. B, Vol.5 (1972) pp.3642-3644
- [4] 渡邊忠雄：超磁歪材料, 工業材料, Vol.50, No.1 (2002) pp.110-111
- [5] 対島立郎：磁性材料の現状, 工業材料, Vol.49, No.12 (2001) pp.18-22
- [6] 柳田博明, 相澤益男, 矢部正也：新センサハンドブック－材料データ編, サイエンスフォーラム (1982) pp.234-239
- [7] 平野光：GaN 系受光素子の火災センサーへの応用, 応用物理, Vol.68 (1999) pp.805-809
- [8] R. D. McKeag, S. S. M. Chan and R. B. Jackman：Polycrystalline diamond photoconductive device with high UV-visible discrimination, Appl. Phys. Lett., Vol.67 (1992) pp.2117-2119
- [9] 藤森直治：ダイヤモンド薄膜の合成とエレクトロニクスへの応用, 電子材料技術雑誌, Vol.2, No.1 (1993) pp.19-25
- [10] M. Aslam, I. Taher, A. Masood, M. A. Tamor and T. J. Potter：Piezoresistivity in vapor-deposited diamond films, Appl. Phys. Lett., Vol.60 (1992) pp.2923-2925
- [11] M. Deguchi, N. Hase, M. Kitabatake, H. Kotera, S. Shima and M. Kitagawa：Piezoresistive property of CVD diamond films, Diamond and Related Materials, Vol.6 (1997) pp.367-373
- [12] 和佐清孝, 任田隆夫：SiC 薄膜高温サーミスタ, National Tech. Rept., Vol.24, No.3 (1978) pp.444-452
- [13] 相澤益男：有機材料技術, 電学誌, Vol.102, No.5 (1982) pp.359-361
- [14] 佐藤進：液晶電界センサ, センサ技術, Vol.7, No.6 (1987) pp.58-61
- [15] 柳田博明：セラミック材料技術, 電学誌, Vol.102, No.5 (1982) pp.355-358
- [16] R. V. Helmolt, J. Wecker, K. Samwer, L. Haupt and K. Bärner：Intrinsic giant magnetoresistance of mixed valence La-A-Mn oxide ($A=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$), J. Appl. Phys., Vol.76 (1994) pp.6925-6928
- [17] 宮野健次郎, 十倉好紀：マンガン酸化物における光誘起絶縁体・金属転移, 固体物理, Vol.34 (1999) pp.637-644
- [18] 島村昭治：機能複合材料, 機能材料, Vol.1, No.1 (1981) pp.42-48
- [19] 坂野久夫：圧電複合材料－ピエゾゴム, 機能材料, Vol.3, No.4 (1983) pp.29-34
- [20] 西郷有民, 高橋泰生, 鈴木崇裕, 一ノ瀬昇：傾斜組成を有する焦電センサ用セラミックス, 電気学会研究会資料, SPM-99-16 (1999) pp.17-20

第3篇 机器人的 机构及控制

Robotics Handbook

内人器財 益も案
同登又内財

第1章 概述

机器人是通过工程的方法来实现人或动物等生物的功能的,其中特别重要的是机构和控制,它们将活体的运动功能加以具体实现。历来所依据的综合方法来设计机构和控制应该都是比较理想的,但是在多数情况下,人们都是基于模块化的观点,将它们作为彼此独立的构成要素来处理。本章也沿用这一做法,对机构和控制分别进行简要说明,至于综合的研究方法则作为今后的发展方向加以叙述。

1.1 机器人的机构

机器人的机构可以仿照生物的形态将其分成与臂、手、足、翅膀、鳍、躯干等相当的部分。臂和手的主要功能在于操作环境中的对象,是使环境发生变化的“操纵”。

足、翅膀、鳍的主要功能在于使机器人身体“移动”。以往,人们关于移动的考虑都是从工程实现的观点出发的,多使用非生物性的机构,即车轮、螺旋桨、推进器等,近年来人们在积极致力于利用腿、脚移动的研究开发。躯干是连接各个器官的基础结构,同时对操作和移动等运动功能均起到很大的作用。

1. 臂和手

手部是抓握对象并将手臂的运动传递给对象的机构。同时,也可以用多个手指来操作对象。如果任务仅仅是用手臂末端简单地固定住对象,那么手部可以设计成单自由度的夹钳机构。如果手臂不运动,那么就需要使用手部来操纵对象,此时多自由度多指型机构就大有用武之地。

手臂通过手部来操纵对象。所谓操纵对象,是指改变对象所具有的位置和姿态的参数(在三维空间中有6个参数),或者对对象施加力的作用。为了自由地操作某个对象,手臂必须有6个操作变量,它们就是所谓的自由度。手臂由杆件及自由度构成,自由度由内部装有电机等驱动器的运动副(又称关

节,joint)来实现。如果机构像人的手臂那样将杆件与自由度以串联的形式连接起来,则称为开式链机械手。如果机构像人的手部那样将杆件与自由度并联配置起来,则称为闭式链机械手。

若对象比较高大,在操作时就需要用整个手臂抱住对象,则称为全臂操作。拟人型机器人可以使用躯干来执行抱起等操作。

2. 移动机构

关于移动,早在机器人问世以前人类就已发明并不断地改进着车辆、船舶、飞机等移动装置。其实在机器人中也借鉴了相关的成熟技术,例如车轮、螺旋桨、推进器等。实用的移动机器人几乎都采用车轮,不过它的弱点是只限于平坦的地面环境。

为了实现人和动物所具备的对地形及环境的高度适应性,现在人们正在积极开展对腿、脚移动的研究。机器人的腿在机构上与其臂和手是同样的,具有3~6个自由度,并联使用1~8条腿,能够实现腿和脚的各种各样的移动。

另外,现在人们还在研究基于蛇的前进原理的利用躯干弯曲变形的移动方式、模仿长臂猿的臂手和双臂交替方式的攀援移动,以及腿脚和车轮的混合移动等。

对于水下机器人或空中机器人,人们既尝试使用推进器及螺旋桨,也在设法运用鳍及翅膀等。

1.2 机器人的控制

1. 自由度的运动来进行控制及转矩(力)

控制

对机器人机构来说,最简单的控制就是分别实施各个自由度的运动(位置及速度)控制。这种控制可以通过对安装在各个自由度的电机实施PID控制来很简单地实现^[1]。在这种情况下,需要根据运动学理论将整个机

机器人的运动分解为各个自由度的运动来进行控制。如果机器人本身能够主动地决定运动,那么可经常使用如移动机器人的车轮控制、机器人手臂的轨迹控制等方法。

与上述相反的方法是根据动力学算出整个机器人运动所需要的转矩,并向各个自由度输出。在机器人与环境之间有约束关系,而各个自由度的运动控制又无法顺利实施时,该方法是很有效的。但是,由于对整个机器人的运动控制属于开环控制,因此由于摩擦及各种误差因素的影响,很难实现精确的运动。

实际的机器人控制基本上都是以上述两种控制为基础,然后再对整个机器人附加反馈控制而构成的。

2. 利用传感器反馈的运动调整

对每个自由度实施运动控制的时候,也可能发生臂和手受到环境约束的情况。这时,机器人与环境之间或许会因为发生过的力而造成损坏。在这样的状态下,机器人必须适应环境,修改预先规划的轨迹(参阅第4篇第3章及第4章)。在这种场合,借助于力传感器反馈力信息,并调整运动,便能够让整个机器人的行动符合任务的需求。

机器人靠腿、脚进行移动时,若地面的平整度有尺寸误差,机器人则可能失去平衡。在这种情况下,也需要通过将着地点的力加以反馈,以调整运动,实现适应地面的平稳步行^[2]。

3. 全局运动控制^[3]

在对自由度进行转矩控制时,除了基于动力学的开环控制,还可以对整个机器人叠加反馈控制。例如,为了用指尖抚摸环境,可以叠加运动控制,以便沿着预设的环境适应方向减小刚性(弹簧强度),而沿着预设严格定位的方向增大刚性。

为了利用多自由度、多指来操作对象,应该沿着抓握对象的内力方向降低刚性,以便协调各个手指。

机器人依靠多足进行移动的情况也同样,考虑到每只脚对地面的适应性,应减小垂直方向上的刚性进行运动控制。面对双足机器人的不稳定系统,必须采用预防倾倒的措施,因此应该从机器人姿态传感器和踝关节

力传感器等获取信息,叠加直立稳定控制。

4. 其他控制

上述控制法都属于从运动学或动力学等出发的所谓基于模型的控制方法。除此之外,人们也正模仿生物体的控制机理,研究仿生型的而非模型的控制法,目前基于神经振子所生成和引入的节奏模式已经实现了稳定的四足机器人、双足机器人的步行控制^[4]。

1.3 今后的发展方向

在上述介绍的传统方法的大部分情况下,都假设杆件是刚体,其不存储应变的能量,力的生成仅靠自由度来实现。利用该方法,能够比较简单地建立具有一般性的系统设计方法。但是,由于驱动器输出有限度、响应速度也有限等原因,在机器人的具体制作方面造成很大的限制。为了弥补这一缺陷,人们尝试了多种办法,例如使杆件具有弹簧或阻尼功能,以便它能无时间延迟地进行能量存储及耗散,或者以硬件的形式引入各个自由度中的弹簧或阻尼功能,以避免时间延迟的问题,而非依靠软件(转矩控制)来实现。这是考虑控制的机构设计的一个例子。另外,也有考虑机构的因素来进行控制设计的例子。例如,有的情况下因减轻重量而导致杆件变细,结果演变成柔性机构,这时就可以尝试通过控制来补偿因此而产生的误差或振动^[5]。如上所述,今后研究中重要的一点是将机构与控制整合起来处理。

在最近的研究结果中,令人印象比较深刻的有 passive walking^[6]。它是一个由无驱动器的自由度组成的、具有类似人体骨骼构件机构的机器人,它能以极其自然的双足步态在向下倾斜的缓坡上行走。这表示该机器人能够巧妙地利用重力下的力学系统特性,恰当且简单地进行机构控制。可以认为,人类等生物的运动机理也与它的原理如出一辙。至今人们还在将它作为 dynamic-based control 的一个更一般性的问题来加以研究^[7]。

高瀬国克

参考文献

第1章 概述

- [1] 日本ロボット学会誌, アクチュエータと機構制御特集, Vol.9, No.4 (1991)

- [2] 同上, ヒューマノイド小特集, Vol.15, No.7 (1997)
- [3] 同上, ソフトロボティクス特集, Vol.16, No.6 (1999)
- [4] 木村浩: 神経モデルを用いた生物型移動ロボット研究の紹介, 日本神経回路学会誌, Vol.18, No.2 (2001) pp.70-76
- [5] 日本ロボット学会誌, フレキシブル・マニピュレータ特集, Vol.12, No.2 (1994)
- [6] S. H. Collins et al.: A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees, The Intern. J. of Robotics Research, Vol.20, No. 7 (2001) pp.607-615
- [7] 大須賀: ロボットの身体性と運動知能—ダイナミクススペースインテリジェンス, 身体性とコンピュータ, bit, 8月号別冊 (2000) pp.175-183

1.1.2 本章



図1.1.2は、ロボットの手（グripper）の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

図1.1.2は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

図1.1.2は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。



1.1.3 本章

図1.1.3は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

図1.1.3は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

1.1.4 本章

1.1.4 本章

図1.1.4は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

図1.1.4は、ロボットの手の動作を示している。左側の図は、グripperが閉じた状態を示し、右側の図は、グripperが開いた状態を示している。この図は、ロボットの手の動作を説明するために用いられている。

1.1.5 本章

図	説明	注
	図1.1.5	本章
	図1.1.6	本章

第 2 章 手臂机构和控制

2.1 手臂机构

可以将机器人机构视为一种连杆机构。设想仿人形的机器人,它包含身体在内的全部肢体(limb)(臂、手、足)都是由杆件(link)及关节(joint)所构成。在这些肢体中,手臂充当直接进行作业的部分,其机构在很大程度上将影响机器人的能力。

本节将以手臂机构的自由度及关节为中心进行叙述。

2.1.1 手臂的基本构造及种类

1. 自由度

手臂由杆件和连接它们的关节构成(在 JIS 中,将杆件的连接部分称为 joint,将平移移动的 joint 称为移动关节,将旋转的 joint 称为旋转关节。但是实际上,机器人的 joint 基本上都被称为“关节”)。一个关节可以有一个或多个自由度(degree of freedom)。

所谓自由度,是表示机器人运动灵活性的尺度,意味着独立的单独运动的数量。由驱动器产生主动动作的自由度称为主动自由度;无法产生驱动力的自由度称为被动自由度。分别将这些自由度所对应的关节称为被动关节和主动关节。

在表 2.1 中给出了有代表性的单自由度关节的符号和运动方向。

表 2.1 单自由度关节

名称	符号	举例
移动		
旋转		

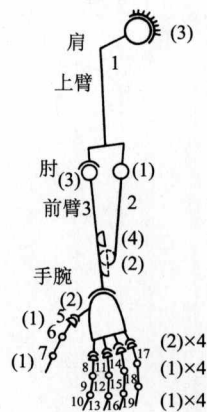
续表 2.1

名称	符号	举例
转动(1)		
转动(2)		

设可动部件的个数为 n 、自由度数为 f 的关节个数为 P_f ,则连杆机构的自由度 F 可以由下式算出^[1]:

$$F = 6n - \sum (6 - f) P_f$$

例如,人上肢的骨骼和关节可如图 2.1 所示。这时, $n=19$, $P_4=1$, $P_3=2$, $P_2=6$, $P_1=11$,故 $F=27$ 。其中,手臂的自由度是 7,手的自由度是 20。



注:()内是自由度数。

图 2.1 人的上肢骨骼和关节

杆件和关节的构成方法大致可以分为两类:从手臂的全貌来看,如果构成手臂的杆件和关节是串联连接,则称其为串联杆件机械手(serial link manipulator)或开式链机械手;由并联连接的则称为并联杆件机械手(parallel link manipulator)^[2]或闭式链机械手。在图 2.2 中,分别给出了串联杆件机械手、并联杆件机械手自由度构成的例子。实际上,大

部分机械手是串联杆件型的。

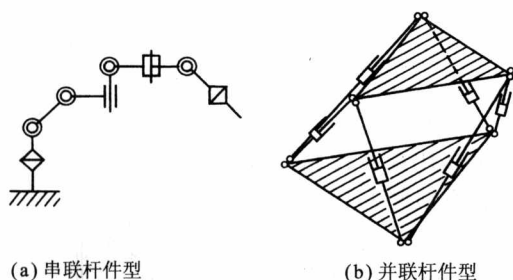


图 2.2 手臂的形态

在三维空间中的无约束物体可以作平行于 x 轴、 y 轴、 z 轴各个轴的平移运动 (translation), 还有围绕各轴的旋转运动 (rotation), 因此它具有与位置有关的 3 个自由度和与姿态有关的 3 个自由度, 共计 6 个自由度。为了能任意操纵物体的位置和姿态, 机器人手臂最少必须有 6 个自由度。

人的手臂有 7 个自由度, 其中肩关节有 3 个, 肘关节有 2 个, 手关节有 2 个。从功能的观点来看, 也可以认为肩关节有 3 个, 肘关节有 1 个, 手关节有 3 个, 它比 6 个自由度还多, 把这种比 6 个自由度还多的自由度称为冗余自由度 (redundant degree of freedom), 把这种自由度的构成称为具有“冗余性 (redundancy)”。人类由于具有冗余性, 在固定了指尖方向和手腕位置的情况下, 可以通过转动肘关节来改变手臂的姿态, 因此能够回避障碍物。决定机器人自由度构成的依据是它为完成给定目标作业所必需的动作。例如, 若仅限于二维平面内的作业, 有 3 个自由度就够了。另外, 在化学工厂这一类障碍物较多的典型环境中, 如果用机器人来实施维修作业, 那么也许将需要 7 个或 7 个以上的自由度。

2. 关节及自由度的构成

关节及其自由度的构成方法将极大地影响机器人的运动范围和可操作性等性能指标。

例如, 机器人如果是球形关节构造, 由于它具有向任意方向动作的 3 个自由度机构, 它能方便地决定适应作业的姿态。然而, 由于驱动器的可动范围的限制, 它很难完全实现与人的手腕等同的功能。所以, 机器人通常是把 3 个单自由度的机构串联起来, 以实现这种 3 个自由度的运动要求。

如果采用串联连接的方法, 即使是相同的 3 个自由度, 由于自由度的组合方法有多种, 结果各自的功能也各不同。

例如, 3 个自由度手腕机构的具体构成方法就有多种。在考虑到 x 轴、 y 轴、 z 轴分别有移动和旋转 (转动) 自由度的条件下, 假设相邻杆件之间无偏距, 而且相邻关节的轴之间又相互垂直或平行, 这样就得出共计有 63 种构型。另外, 如果再叠加各具 1 个旋转自由度的 3 个关节构成 6 个自由度的手臂, 则它共达到 909 种关节构成形式^[3]。因此, 有必要根据目标作业的要求等若干个准则来决定有效的关节构成方式 (关于这种评价方法, 将在第 3 篇 2.5 节中叙述)。

另外, 在进行自由度组合时, 必须注意奇异点 (singular point) 的存在^[4]。所谓奇异点, 是指由于手臂机构的约束, 丧失在某一个特定方向的自由度功能的手臂姿势。奇异点的问题是由于这种自由度的退化而造成的, 在奇异点的附近, 关节必须做急剧的姿态变化, 驱动系统将承受很大的负荷。奇异点的回避问题, 主要依靠对手臂的轨迹控制来加以解决。在设计时, 有效的方法是设法使关节及自由度的构成在执行作业内容时有利于回避奇异点。奇异点的例子如图 2.3 所示, 在图 2.3 中, 沿箭头方向的自由度已经退化, 机械手不能沿此方向进行运动。

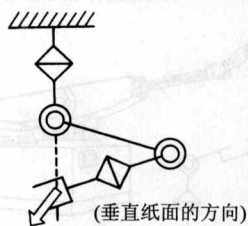


图 2.3 奇异点

3. 动作形态的分类

手臂的主要目的是完成末端在三维空间内的定位。为此, 如前所述手臂必须要有 3 个自由度。关于实现这样的自由度的关节构成法, 若考虑移动、转动、旋转三种机构的组合, 则共计存在 27 种形式。然而根据它的动作形态, 具有代表性的关节构成可以分成下面四种。

如果关节的旋转轴是沿着杆件长度方向

的,那么称之为旋转;如果关节的旋转轴是沿着杆件长度的垂直方向的,则称之为转动。在JIS中将它们分别称为“旋转关节(1)”及“旋转关节(2)”。

- ① 圆柱坐标型机器人。
- ② 极坐标型机器人。
- ③ 直角坐标型机器人。
- ④ 关节型机器人。

圆柱坐标型机器人(cylindrical coordinate robot,图2.4)由一个旋转和两个移动的自由度组合构成;极坐标型机器人(polar coordinate robot,图2.5)由旋转、转动、移动的自由度组合构成。这两种机器人均具有转动或旋转自由度,故都有较大的运动范围(motion range),其坐标计算也比较简单。世界上最初实用化的工业机器人“Versatran”和“Unimate”就分别采用了圆柱坐标型和极坐标型。

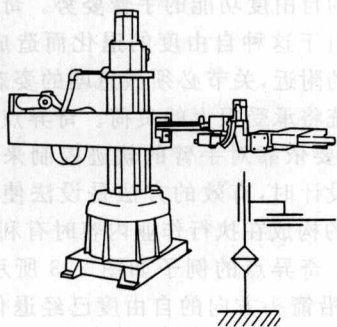


图 2.4 圆柱坐标型机器人

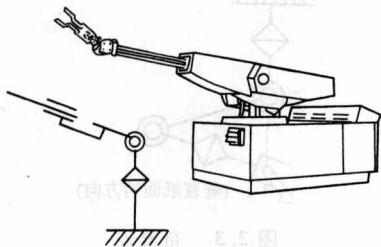


图 2.5 极坐标型机器人

直角坐标型机器人(cartesian coordinate robot,图2.6)的关节所具有的自由度分别独立地安排在 x 轴、 y 轴、 z 轴。其结构简单,精度高,坐标计算和控制也极为简单,然而为了实现在大的运动范围,机构的尺寸也比较大。

关节型机器人(articulated robot)主要由旋转关节和转动关节组成,可以看成是拟人手臂肘关节的杆件关节结构。由肘(elbow)

至手臂根部(肩, shoulder)的部分称为上臂(upper arm),从肘到手腕(wrist)的部分称为前臂(forearm)。这种结构对于确定三维空间内的任意位置和姿态是最有效的。它对于各种各样的作业具有良好的适应性,它的缺点是坐标计算和控制比较复杂,而且难以达到高精度的要求。

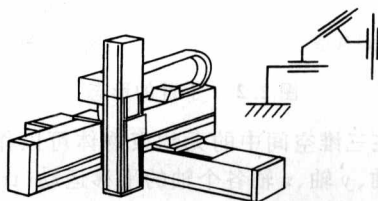


图 2.6 直角坐标型机器人

根据自由度的构成方法,关节型机器人可以再进一步地分成几类。

图2.7所示是一般手臂的结构,它采用旋转、转动的自由度结构。

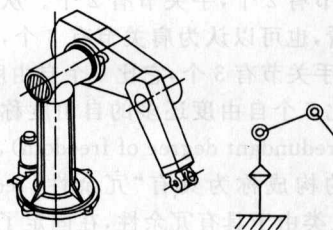


图 2.7 关节型机器人(普通型)

图2.8所示是在标准手臂上再加上一个自由度(冗余自由度)的、所谓拟人型(anthropomorphic)手臂,冗余自由度为1^[5]。

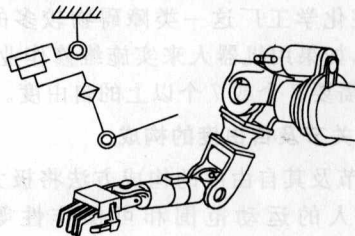


图 2.8 关节型机器人(拟人型)

图2.9的手臂采用了平行四边形杆件,并把关节驱动用的驱动器装在手臂的根部。

图2.10称为SCARA型机器人(Selective Compliance Assembly Robot Arm),该机器人手臂的前端结构由在二维平面内能任意移动的自由度构成,所以它具有在垂直方向上的

高刚性和在水平面内的低刚性(柔顺性)的特征^[6],但在实际操作中主要不是由于它所具有的这种特殊的柔顺性质,而是因为它更能简单地实现二维平面内的动作,因而在装配作业中得到普遍采用。

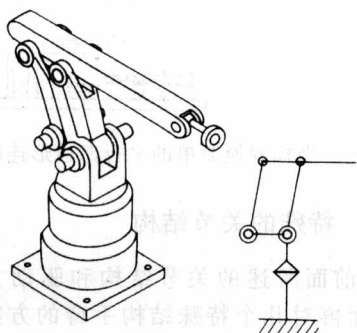


图 2.9 关节型机器人(平行四边形连杆图)

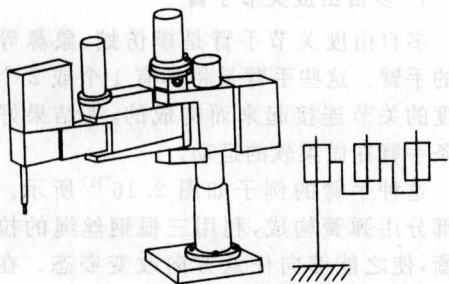


图 2.10 SCARA 型机器人

2.1.2 关节的驱动方式

关节的驱动方式有直接驱动方式和间接驱动方式两种。

直接驱动方式是驱动器的输出轴和机器人手臂的关节轴直接相连;间接驱动方式则是把驱动器的动力通过减速器或钢丝绳、皮带、平行连杆机构等传递给关节。远距离驱动方式是间接驱动方式的一种。

1. 直接驱动方式

直接驱动方式的优点是驱动器和关节之间的机械系统较少,因而能够减少摩擦等非线性因素的影响,控制性能比较好。然而,为了直接驱动手臂的关节,驱动器的输出转矩必须很大。此外,由于不能忽略动力学对手臂运动的影响,因此控制系统还必须考虑到手臂的动力学问题(2.3节)。

高输出转矩的驱动器有旋转式及油缸式液压装置,另外还有力矩电机等,其中液压式

装置在结构和摩擦等方面的非线性因素很强,所以很难体现出直接驱动的优点。

与此相反,在 20 世纪 80 年代所开发的力矩电机,采用了非线性主要因素的轴承机械系统,得到了优良的逆向驱动能力(从关节一侧带动驱动器的输出轴)。在图 2.11 中示出了使用力矩电机的直接驱动方式的关节结构实例^[7]。使用这样的直接驱动方式的机器人,通常被称为直接驱动机器人(DD 机器人)。

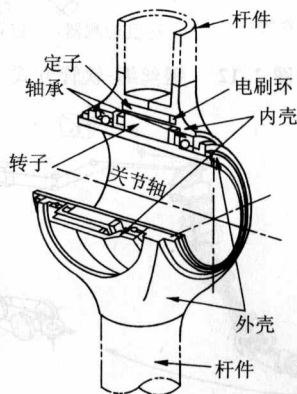


图 2.11 直接驱动方式举例

2. 间接驱动方式

间接驱动方式中包括带减速器的电机驱动、远距离驱动等几种。远距离驱动将驱动器与关节分离,目的在于减小关节的体积,减轻它的重量。一般来说,驱动器的输出都远远小于驱动关节所需要的力,因此需要通过减速器来增大驱动力。远距离驱动的优点在于能够将多自由度机器人关节驱动所必需的多个驱动器设置在合适的场所。一般来说,机器人手臂都采用悬臂梁结构,远距离驱动是减轻位于手臂根部关节的驱动器负载的一种措施。

远距离驱动方式有以下几种。

1) 钢丝绳

这是把驱动器和关节分开安装,然后通过钢丝绳传递动力的方式。这种方式又被进一步分为软管方式和滑轮方式两种。

在软管方式中,钢丝绳的路径可以任意决定,所以能够较容易地构成多自由度的驱动系统。但钢丝绳和软管之间存在不能忽略的摩擦,而且其摩擦力会随着软管路径的变化而变化,所以对其精确控制比较困难。

滑轮方式的非线性因素较少,但是也出

现了新的问题,即滑轮的配置方式、钢丝绳的路径等设计非常困难,所以将其小型化比较困难。

软管方式及滑轮方式的动力传递机构分别如图 2.12 和图 2.13 所示^[8~10]。



图 2.12 钢丝绳-软管方式

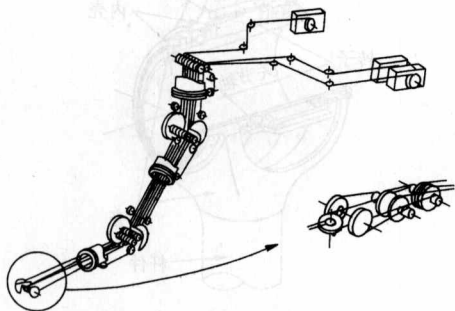


图 2.13 钢丝绳-滑轮方式

2) 链条,同步带

这种方式也是把驱动器安置在离关节较远的地方,是远距离驱动的手段之一。与钢丝绳相比,链条和同步带的刚性高,能传递的输出大,但在设计上的限制也较多。在 SCARA 型的关节机器人中多采用此方法。同步带驱动关节的实例如图 2.14 所示。

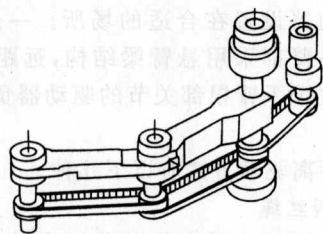


图 2.14 同步带驱动关节实例

3) 平行四边形连杆(缩放)机构方式

图 2.9 所示的机器人是平行四边形连杆机构方式之一。这种方式的特点是把驱动器安装在手臂的根部,不仅有效地减轻了施加于手臂的电机自重的负荷,而且使坐标运算变得极为简单,其实例如图 2.15^[11]所示。

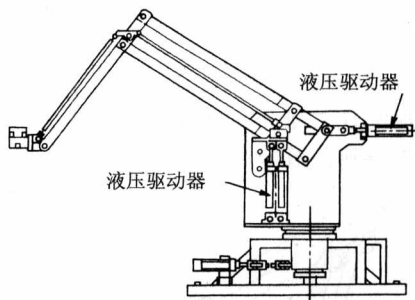


图 2.15 坐标变换简单的平行四边形连杆方式

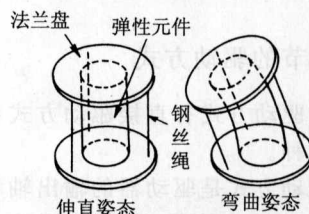
2.1.3 特殊的关节结构

除前面所述的关节结构和驱动方式之外,下面再对几个特殊结构手臂的方案加以讨论。

1. 多自由度关节手臂

多自由度关节手臂是模仿蛇、象鼻等动作的手臂。这些手臂是将具有 1 个或 2 个自由度的关节连接起来而构成的,其结果好像整条手臂在做柔软的运动。

这种手臂的例子如图 2.16^[12]所示。关节部分用弹簧构成,利用三根钢丝绳的拉力平衡,使之能够向任意方向改变姿态。在这种情况下,它的自由度是 2。



(a) 关节构造(2自由度)



(b) 钢丝绳

图 2.16 多自由度关节构造

2. 圆锥齿轮传动

为了减轻驱动器的负载,串联杆件型的机械手一般并非将驱动器都安装在各个关节处,而是尽可能将其安装在根部附近。此时,圆锥齿轮是把动力传递到机械手前端的有效

手段。

如图 2.17~图 2.19 所示,圆锥齿轮传动方式是在关节上用圆锥齿轮构成多重动力传输轴,并穿过其他关节将动力传递到各个目标关节上去。当然,如果自由度数过多,机构变得又大又重,它的优点也就丧失了。

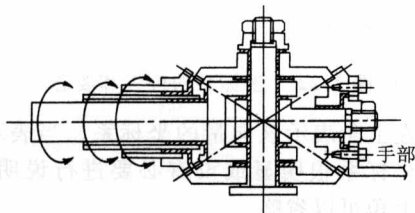


图 2.17 圆锥齿轮传动方式(1)

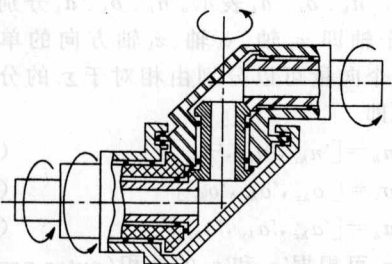


图 2.18 圆锥齿轮传动方式(2)

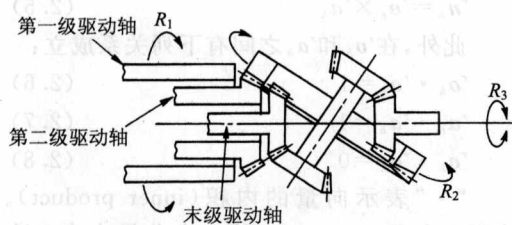


图 2.19 圆锥齿轮传动方式(3)

在圆锥齿轮传动方式中,可以列举出如图 2.18 所示的 6 个自由度机械手 Lemma 的手腕部分、图 2.19 所示的 Three Roll Wrist^[13,14]的例子。

3. 带自重补偿机构的手臂

开式链机械手关节所承受的自重负荷是随着机械手姿态的变化而不同的,特别是根部关节的变动更为激烈,在关节减速比小的机械手中,必须伴随惯性力的起伏变化进行非线性控制。另外,对于一般的机械手,驱动器输出中支付给自重补偿的功率部分也不可忽略。基于这样的原因,人们提出了一些配重、自重补偿连杆机构等方案以达到补偿自重的目的。

配重的方法就如同不倒翁,对于施加了作业负荷的构件,如果在关节的相反一侧预先加上适当的负荷,就能简单地实现自重补偿。但是,这种方法的缺点是惯性力大,根部关节受到的自重负荷比前部关节所受到的更大。自重补偿连杆机构的方式是在平行四连杆机构组成的机械手结构上连接由弹簧或钢丝绳构成的自重补偿机构,它能有效和简单地实现三维小型自重补偿。自重补偿杆件的例子如图 2.20 所示^[15]。

菅野重树

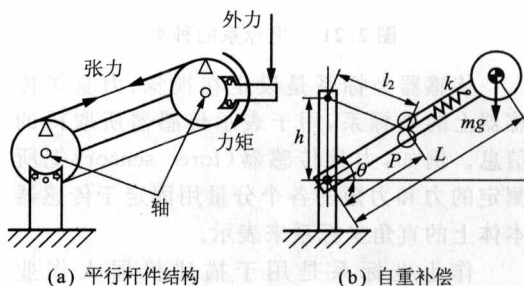


图 2.20 三维自重补偿机构

2.2 手臂运动学

2.2.1 坐标变换的基础

1. 坐标系的种类

运动学分析(kinematic analysis)是对杆件(link)、传感器(sensor)等机器人的各个部分和作业环境内的对象等设定坐标系(coordinate system),然后分析这些坐标系之间的位置(position)和姿态(orientation)的关系。这种情况示于图 2.21 中,设定的坐标系是三维直角坐标系,把它记为 $\Sigma(O-xyz)$,下角标表示坐标系的种类。

为运动学分析所设定的坐标系大致可以分为杆件坐标系(link coordinate system)、传感器坐标系(sensor coordinate system)和作业坐标系(task coordinate system)。杆件坐标系是固定于手臂各个杆件上的坐标系,它表示杆件的位置和姿态。设定于机器人上的基座坐标系(base coordinate system)和设定于末端执行器(end effector)上的末端执行器坐标系(end effector coordinate system)也可以将其看成是杆件坐标系的一种。杆件坐标系的系统设定方法有为人熟知的 Denavit-

Hartenberg 方法,这个方法将在本节的 4. 中详述。

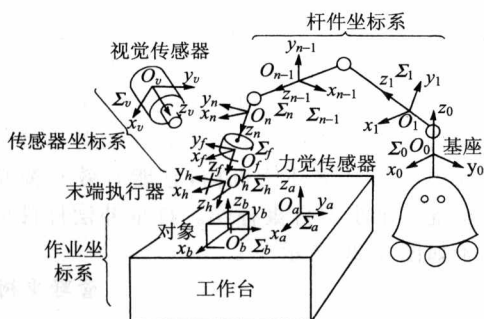


图 2.21 坐标系的种类

传感器坐标系是设定在视觉、力觉等传感器上的坐标系,用于表示传感器所取得的信息。例如,力觉传感器(force sensor)把所测定的力和力矩的各个分量用固定于传感器本体上的直角坐标系来表示。

作业坐标系是用于描述机器人作业(task)的坐标系,它被设定在作业对象上,作业对象将随作业情况的变化而变化,所以作业坐标系也会根据情况随时变化。例如,在如图 2.21 所示的把位于工作台上的某一物体移向其他位置的作业中,在抓住物体之前,手臂运动是由设定于该物体上的坐标系来描述的;抓住物体之后,就改成由设定于物体移动目标地点的坐标系来描述了。在这种情况下,坐标系分两种:一种是抓取物体之前的设定于物体上的坐标系,另一种是抓取物体之后的设定于工作台上的坐标系。机器人作业环境的几何模型是通过在环境内的对象上设定坐标系,并根据所设定的坐标系之间的关系来建立的。这种机器人的环境几何模型也称为世界模型,它经常在机器人的编程中被使用。

2. 坐标系的位置和姿态

设有两个坐标系 Σ_r 和 Σ_h , 下面就 Σ_h 对 Σ_r 的位置和姿态进行讨论。 Σ_r 和 Σ_h 的关系表示于图 2.22。

Σ_h 相对于 Σ_r 的位置,用向量 r_p 表示。 r_p 是由 Σ_r 的原点 O_r 至 Σ_h 的原点 O_h 的向量。可以由相对于 Σ_r 的分量表示,即

$$r_p = [r_{px}, r_{py}, r_{pz}]^T \quad (2.1)$$

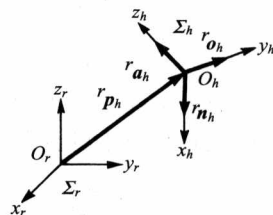


图 2.22 坐标系的位置和姿态

左上角表示该向量的坐标系。当表示向量的坐标系很明显或没有必要进行说明时,这个上角可以省略。

Σ_h 相对于 Σ_r 的姿态,由单位向量(unit vector) r_{nh}, r_{oh}, r_{ah} 表示。 r_{nh}, r_{oh}, r_{ah} 分别是 Σ_h 的各个轴即 x_h 轴、 y_h 轴、 z_h 轴方向的单位向量,各个向量可以分别由相对于 Σ_r 的分量来表示,即

$$r_{nh} = [r_{nhx}, r_{nhy}, r_{nhz}]^T \quad (2.2)$$

$$r_{oh} = [r_{ohx}, r_{ohy}, r_{ohz}]^T \quad (2.3)$$

$$r_{ah} = [r_{ahx}, r_{ahy}, r_{ahz}]^T \quad (2.4)$$

r_{nh} 可根据 r_{oh} 和 r_{ah} 的外积(outer product)来计算,即

$$r_{nh} = r_{oh} \times r_{ah} \quad (2.5)$$

此外,在 r_{oh} 和 r_{ah} 之间有下列关系成立:

$$r_{oh} \cdot r_{oh} = 1 \quad (2.6)$$

$$r_{ah} \cdot r_{ah} = 1 \quad (2.7)$$

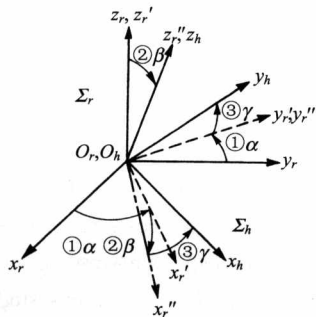
$$r_{oh} \cdot r_{ah} = 0 \quad (2.8)$$

“ \cdot ”表示向量的内积(inner product)。

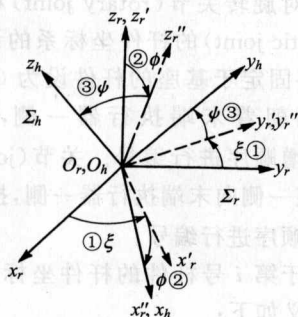
从而在向量 r_{nh}, r_{oh}, r_{ah} 的 9 个分量中有 3 个是独立分量。由此可知,坐标系的姿态可用 3 个参数表示。

表示坐标系姿态的参数,有人们熟知的欧拉角(Euler angles)与横摇角、纵摇角、偏转角(roll, pitch and yaw angles)^[1]等几种。

欧拉角 α, β, γ 的定义示于图 2.23 中。图 2.23 中使 Σ_r 和 Σ_h 的原点一致。如图 2.23 所示,将 Σ_r 依次绕 z_r 轴、 y_r' 轴、 z_r'' 轴分别旋转 α, β, γ 角,就得到 Σ_h 。 y_r' 轴是将 Σ_r 绕 z_r 轴旋转 α 所得到的坐标系 Σ_r' 的 y 轴, z_r'' 轴是将 Σ_r' 再以 y_r' 为旋转轴旋转 β 角所得到的坐标系 Σ_r'' 的 z 轴。此外,依次将 Σ_r 绕 x_r 轴、 y_r 轴、 z_r 轴旋转 γ, β, α , 也可以得到 Σ_h 。

图 2.23 欧拉角(α, β, γ)

横摇角、纵摇角、偏转角,即 ξ, ϕ, ψ 的定义示于图 2.24 中。如图 2.24 所示,将 Σ_r 依次绕 z_r 轴、 y_r' 轴、 x_r'' 轴旋转 ξ, ϕ, ψ 角就得到 Σ_h 。 y_r' 轴是将 Σ_r 以 z_r 为旋转轴旋转 ξ 所得到的坐标系 Σ_r' 的 y 轴, x_r'' 轴是将 Σ_r' 再以 y_r' 为旋转轴旋转 ϕ 角所得到的坐标系 Σ_r'' 的 x 轴。此外,将 Σ_r 依次绕 x_r 轴、 y_r 轴、 z_r 轴旋转 ψ, ϕ, ξ ,也可以得到 Σ_h 。

图 2.24 横摇角、纵摇角、偏转角(ξ, ϕ, ψ)

在姿态角定义中的重点是旋转的顺序。旋转的顺序改变后,即使绕各个轴的旋转角度相同,结果所得到的坐标系的姿态也会各异。若把欧拉角和横摇角、纵摇角、偏转角以向量形式表示,则可以写为

$$\phi = [\alpha, \beta, \gamma]^T \text{ 或 } [\xi, \phi, \psi]^T \quad (2.9)$$

但必须注意 ϕ 不是向量, ϕ 不能满足向量的定理。从这个意义上来说, ϕ 常常被称为伪向量(pseudo-vector)^[3]。

3. 齐次变换

令 Σ_h 是将 Σ_r 平移(translation)和旋转(rotation)后所得到的坐标系。这种平移及旋转所导致的坐标系的移动(变换)可以通过齐次

变换(homogeneous transformation)表示^[1]。若将 Σ_h 对于 Σ_r 的位置向量设为 ${}^r p_h$,姿态向量设为 ${}^r n_h, {}^r o_h, {}^r a_h$,则该齐次变换可由下式给出:

$${}^r H_h = \begin{bmatrix} {}^r n_h & {}^r o_h & {}^r a_h & {}^r p_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

在齐次变换中,三维空间内的点用四维空间内的点来表示。令三维空间内的点为

$$b = [b_x, b_y, b_z]^T \quad (2.11)$$

则表示它的四维空间内的点由下式给出:

$$b' = [b_x', b_y', b_z', w]^T \quad (2.12)$$

其中,

$$b_x = \frac{b_x'}{w}$$

$$b_y = \frac{b_y'}{w}$$

$$b_z = \frac{b_z'}{w}$$

式中, w 为不是零的任意值,这种四维空间的坐标系称为齐次坐标系(homogeneous coordinate system)。即使把齐次坐标系所表示的比例放大若干倍,它所对应的三维空间的点的位置也不会变。通常令 $w=1$ 。当 $w=0$ 时, b' 表示 $[b_x, b_y, b_z]^T$ 方向的无限大向量。这个向量用于表示方向。

如图 2.25 所示,对于同一点 B ,由 Σ_r 来看得到的向量设为 ${}^r b$,由 Σ_h 来看得到的向量设为 ${}^h b$ 。设点 B 是伴随着 Σ_h 的移动而与之一起移动的点,各个向量分别以 Σ_r, Σ_h 中的分量来表示。这时有下式:

$${}^r b = {}^r O_h {}^h b + {}^r p_h \quad (2.13)$$

${}^r O_h$ 是用式(2.14)所定义的 3×3 旋转变换矩阵

$${}^r O_h = [{}^r n_h \quad {}^r o_h \quad {}^r a_h] \quad (2.14)$$

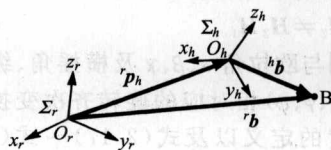


图 2.25 位置的变换

若设对应于 ${}^r b, {}^h b$ 的四维向量分别为 ${}^r b', {}^h b'$,则式(2.13)和下式等效:

$${}^r b' = {}^r H_h {}^h b' \quad (2.15)$$

由定义很明显地发现,齐次变换矩阵 H_a 表示由 Σ_r 来看 Σ_a 的位置和姿态。若坐标系仅沿向量 $p=[p_x, p_y, p_z]^T$ 平行移动,则其变换由下式给出:

$$H_{\text{trans}}(p) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

另外,只绕 x 轴、 y 轴、 z 轴旋转 θ 角的变换,分别由下式给出:

$$H_{\text{rot}}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$H_{\text{rot}}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$H_{\text{rot}}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

当给定齐次变换矩阵 H_1 、 H_2 时,把 H_2 右乘 H_1 后的变换如下式:

$$H = H_1 H_2 \quad (2.20)$$

这意味着是根据 H_1 进行坐标系变换之后,以变换所得的坐标系为基准,再进行 H_2 的变换。相反,把 H_2 左乘 H_1 后的变换为

$$H = H_2 H_1 \quad (2.21)$$

这意味着是根据 H_1 进行坐标系变换之后,以变换前的坐标系为基准,继续进行 H_2 的变换。因此,当然存在下列关系:

$$H_1 H_2 \neq H_2 H_1 \quad (2.22)$$

分别与欧拉角 α 、 β 、 γ 及横摇角、纵摇角、偏转角 (ξ, ϕ, ψ) 相对应的旋转齐次变换矩阵,根据角度的定义以及式(2.17)~式(2.19),可以分别按下列形式进行计算:

$$H_{\text{Euler}} = H_{\text{rot}}(z, \alpha) H_{\text{rot}}(y, \beta) H_{\text{rot}}(x, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta \cos\gamma - \sin\alpha \sin\gamma \\ \sin\alpha \cos\beta \cos\gamma + \cos\alpha \sin\gamma \\ -\sin\beta \cos\gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\cos\alpha \cos\beta \sin\gamma - \sin\alpha \cos\gamma & \cos\alpha \sin\beta & 0 \\ -\sin\alpha \cos\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta & 0 \\ \sin\beta \sin\gamma & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$H_{\text{RPY}} = H_{\text{rot}}(z, \xi) H_{\text{rot}}(y, \phi) H_{\text{rot}}(x, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\xi \cos\phi & \cos\xi \sin\phi \sin\psi - \sin\xi \cos\psi \\ \sin\xi \cos\phi & \sin\xi \sin\phi \sin\psi + \cos\xi \cos\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi \sin\psi \\ 0 & 0 \\ \cos\xi \sin\phi \cos\psi + \sin\xi \sin\psi & 0 \\ \sin\xi \sin\phi \cos\psi - \cos\xi \sin\psi & 0 \\ \cos\phi \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

4. 杆件坐标系

杆件坐标系的选择方法有许多种,但是最为普遍的方法是 Denavit-Hartenberg 方法^[4,5],如图 2.26 所示^[1]。图 2.26(a)和(b)分别表示对旋转关节(rotary joint)和移动关节(prismatic joint)的杆件坐标系的设定。在杆件中,将固定于基座的杆件设为 0,然后从基座一侧朝着末端执行器一侧,按 1, 2, 3, ... 的递增顺序进行编号。关节(joint)也一样,从基座一侧向末端执行器一侧,按 1, 2, 3, ... 的递增顺序进行编号。

固定于第 i 号杆件的杆件坐标系 $\Sigma_i(O_i; x_i, y_i, z_i)$ 定义如下:

- ① 将第 $i+1$ 关节的旋转或移动轴设为 z_i 轴,令 z_i 轴的方向为旋转和移动的正方向。
- ② 将 z_{i-1} 轴和 z_i 轴的公共法线与 z_i 轴的交点设为原点 O_i 。当 z_{i-1} 轴和 z_i 轴相交时,令其交点为原点,令 O_0 和 O_1 一致。
- ③ 将 z_{i-1} 轴和 z_i 轴的公共法线由 z_{i-1} 向 z_i 轴方向延长,取其延长线为 x_i 轴。 z_{i-1} 轴和 z_i 轴相交时,取 x_i 轴平行于 $a_{i-1} \times a_i$,此时 x_i 轴允许指向任何方向。 a_{i-1} 、 a_i 分别是在 z_{i-1} 轴、 z_i 轴方向的单位向量。
- ④ 根据 x_i 轴和 z_i 轴来确定 y_i 轴,使它们构成右手坐标系。

杆件坐标系 Σ_i 相对于 Σ_{i-1} 的位置与姿态由图 2.26 中所示的 4 个参数 a_i 、 α_i 、 d_i 、 θ_i 来表示, a_i 、 α_i 、 d_i 、 θ_i 的定义如下:

- ① 设 z_{i-1} 轴和 z_i 轴的公共法线长度为 a_i 。

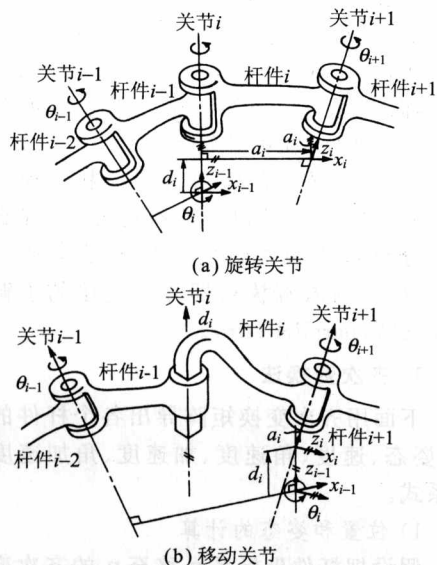


图 2.26 杆件坐标系和它的参数

a_i 被称为杆件的长度。

② z_i 轴相对于 z_{i-1} 轴的角度是 α_i , 称 α_i 是杆件的扭转角 (twist)。 α_i 的正方向是 x_i 轴的方向。

③ 从 O_{i-1} 沿 z_{i-1} 轴方向测得的 z_{i-1} 轴与 z_i 轴的公共法线的距离就是 d_i 。

④ x_i 轴相对于 x_{i-1} 轴构成的角度是 θ_i , θ_i 的正方向是 z_{i-1} 轴的方向。

在以上定义的 4 个参数中, 对于旋转关节, θ_i 表示关节动作的关节变量; 对于移动关节, d_i 表示关节动作的关节变量 (joint variable)。其他的 2 个参数均为表示杆件形状的杆件参数 (link parameter)。

此外, 如图 2.26(b) 所示, 当第 i 号关节是移动关节时, 即使决定了 z_{i-1} 轴的方向, 也不能决定其位置。这时, 应该根据满足 $a_i = 0$ 的条件来决定 z_{i-1} 轴的位置。

按照上述杆件坐标系的定义, 还不能决定固定于终端杆件, 即末端执行器的坐标系。通常情况下, 终端杆件坐标系的原点和距离它最近的一个杆件坐标系的原点一致。

Σ_i 对 Σ_{i-1} 的变换, 是由绕 z_{i-1} 轴旋转 θ_i 角, 再沿着旋转后坐标系的 z_{i-1} 轴和 x_{i-1} 轴分别作 d_i 和 α_i 的平移及绕平移后坐标系的 x_{i-1} 轴旋转 α_i 角的合成。根据式 (2.16)、式 (2.17)、

式 (2.19), Σ_i 对 Σ_{i-1} 的变换可由下面的齐次变换矩阵 A_i 表示:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

5. 杆件坐标系举例

下面以图 2.27 所示的机器人手臂为例说明杆件坐标系设定的 Denavit-Hartenberg 方法。该手臂是为研究而开发的, 称为 D-ARM (Dynamic-ARM)^[6], 其自由度为 6 个。

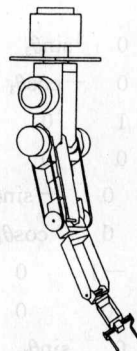


图 2.27 D-ARM

表 2.2 D-ARM 的杆件参数

i	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	θ_i
1	0	90	0	θ_1
2	300	0	0	θ_2
3	0	90	0	θ_3
4	0	-90	300	θ_4
5	0	90	0	θ_5
6	0	0	0	θ_6

图 2.28 给出了设定的杆件坐标。在表 2.2 中给出了杆件参数。 θ_i ($i=1\sim 6$) 是关节变量, 齐次坐标矩阵如下所示:

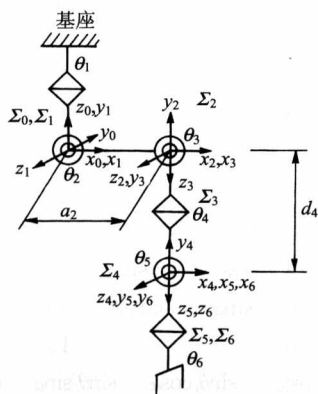


图 2.28 D-ARM 的杆件坐标

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.2.2 正运动学方程式

所谓正运动学(direct kinematics),是指给出关节的位置、速度、加速度,求各个杆件的位置、姿态、速度、加速度、角速度、角加速度的问题。特别是求终端杆件(即末端执行器)的位置、姿态、速度、角速度的问题,这在

应用上很重要。正运动学简称为 DK。已知正运动学的解析法有齐次变换法和向量法。下面就各种方法进行叙述。注意,若无特别指定,向量就约定用基座坐标系 Σ_0 中的分量来表示。此外,在第 3 篇的 2.2.2~2.2.5 节中,主要对开式链的手臂进行分析。如果手臂上的杆件是并联到末端执行器上,那么运动的分析可参阅本篇的 2.5 节或文献[7],[8]。杆件与末端执行器并联连接的手臂称为并联臂(parallel arm)。

1. 齐次变换法

下面用齐次变换矩阵导出各个杆件的位置、姿态、速度、角速度、加速度、角加速度的关系式。

1) 位置和姿态的计算

假设把杆件坐标系 Σ_j 移至 Σ_k 的齐次变换矩阵为 jT_k , jT_k 可利用式(2.25)中的 A_i 按下式计算:

$${}^jT_k = A_{j+1} A_{j+2} \cdots A_k \quad (2.32)$$

jT_k 表示从 Σ_j 来看的 Σ_k 的位置和姿态,所以由式(2.32)可以求出杆件 k 相对于杆件 j 的位置和姿态。设杆件 k 上的某点相对于 Σ_k 的位置为 ${}^k b$,而相对于 Σ_j 的位置为 ${}^j b$,则有

$${}^j b' = {}^jT_k {}^k b' \quad (2.33)$$

式中, ${}^j b'$ 和 ${}^k b'$ 分别为与 ${}^j b$ 和 ${}^k b$ 相对应的由式(2.12)所定义的齐次坐标向量。

杆件 i 的坐标系 Σ_i 相对于基座坐标系 Σ_0 的位置 p_i 和姿态 n_i, o_i, a_i , 可以由齐次变换矩阵 0T_i 表示,即

$$\begin{aligned} {}^0T_i &= A_1 A_2 \cdots A_i \\ &= \begin{bmatrix} n_i & o_i & a_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.34)$$

各个向量的左上角的脚标省略。若设杆件 i 上的某点相对于 Σ_i 的位置为 ${}^i b$,而其相对于 Σ_0 的位置为 ${}^0 b$,则有

$${}^0 b' = {}^0T_i {}^i b' \quad (2.35)$$

如图 2.29 所示,设末端执行器的坐标系为 Σ_h ,将表示 Σ_h 的位置、姿态的参考坐标系(reference coordinate system)设为 Σ_r ,则 Σ_h, Σ_r 分别相对于杆件坐标系 Σ_n, Σ_0 存在着一定的位置和姿态的关系。这里 n 是手臂的自由度数。若设由 Σ_r 到 Σ_0 和由 Σ_n 到 Σ_h 的齐次变换矩阵分别为 rH_0 和 nH_h ,则把 Σ_r 移至 Σ_h 的齐次变换矩阵 rH_h 如下:

$$\begin{aligned} {}^r\mathbf{H}_h &= {}^r\mathbf{H}_0 {}^0\mathbf{T}_n {}^n\mathbf{H}_h \\ &= \begin{bmatrix} {}^r\mathbf{n}_h & {}^r\mathbf{o}_h & {}^r\mathbf{a}_h & {}^r\mathbf{p}_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.36) \end{aligned}$$

式中, ${}^r\mathbf{n}_h$ 、 ${}^r\mathbf{o}_h$ 、 ${}^r\mathbf{a}_h$ 、 ${}^r\mathbf{p}_h$ 分别表示相对于 Σ_r 的 Σ_h 的姿态和位置。表示 Σ_h 姿态的向量 ${}^r\mathbf{n}_h$ 、 ${}^r\mathbf{o}_h$ 、 ${}^r\mathbf{a}_h$ 分别称为法线向量(normal vector)、方向向量(orientation vector)和接近向量(approach vector)。 ${}^r\mathbf{p}_h$ 是相对于 Σ_r 的 Σ_h 的位置向量(position vector)。

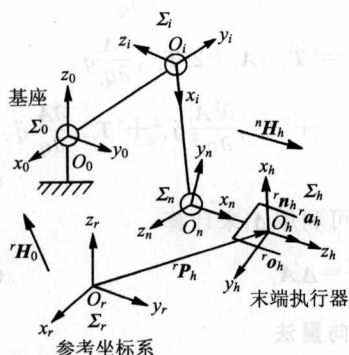


图 2.29 末端执行器的位置和姿态

若计算出 ${}^r\mathbf{H}_h$, 则根据第 4 列的分量, 就可以直接求得末端执行器相对于 Σ_r 的位置。姿态角可以通过将 ${}^r\mathbf{H}_h$ 的各个分量和式(2.23)或式(2.24)的各分量加以比较而求得。

欧拉角 α 、 β 、 γ 是将 ${}^r\mathbf{H}_h$ 与式(2.23)进行比较后, 按下式求得的:

$$\alpha = \arg({}^r\mathbf{a}_{hx}, {}^r\mathbf{a}_{hy}), \text{ 或者} \quad (2.37)$$

$$\arg({}^r\mathbf{a}_{hx}, {}^r\mathbf{a}_{hy}) + \pi$$

$$\beta = \arg({}^r\mathbf{a}_{hx}, {}^r\mathbf{a}_{hx} \cos \alpha + {}^r\mathbf{a}_{hy} \sin \alpha) \quad (2.38)$$

$$\gamma = \arg(-{}^r\mathbf{o}_{hx} \sin \alpha + {}^r\mathbf{o}_{hy} \cos \alpha, -{}^r\mathbf{n}_{hx} \sin \alpha + {}^r\mathbf{n}_{hy} \cos \alpha) \quad (2.39)$$

上式中, $\arg(x, y)$ 表示复数 $z = x + iy$ 的幅角(argument), $\arg(x, y)$ 也可以写成 $\text{atan2}(y, x)$ 。

横摇角、纵摇角、偏转角分别为 ξ 、 ϕ 、 ψ , 可以通过与式(2.24)进行比较后, 按下式求得:

$$\xi = \arg({}^r\mathbf{n}_{hx}, {}^r\mathbf{n}_{hy}), \text{ 或者} \quad (2.40)$$

$$\arg({}^r\mathbf{n}_{hx}, {}^r\mathbf{n}_{hy}) + \pi$$

$$\phi = \arg({}^r\mathbf{n}_{hx} \cos \xi + {}^r\mathbf{n}_{hy} \sin \xi, -{}^r\mathbf{n}_{hx}) \quad (2.41)$$

$$\psi = \arg(-{}^r\mathbf{o}_{hx} \sin \xi + {}^r\mathbf{o}_{hy} \cos \xi, {}^r\mathbf{a}_{hx} \sin \xi - {}^r\mathbf{a}_{hy} \cos \xi) \quad (2.42)$$

同样, 若将式(2.34)中所给出的 ${}^0\mathbf{T}_i$ 的各个分量和式(2.23)或式(2.24)的各个分量相比较, 则可以计算出各杆件的相对于基座坐

标系的姿态角。但各杆件的姿态角一般很少用欧拉角或横摇角、纵摇角、偏转角等来表示。

2) 速度和角速度的计算

各杆件的速度、角速度可按下式求得。若设 ${}^i\mathbf{b}$ 相对于 Σ_i 是静止的, 则杆件 i 上的点 ${}^i\mathbf{b}$ 相对于 Σ_i 的速度, 就可以通过对式(2.35)的两边进行微分而求得, 即

$${}^0\dot{\mathbf{b}}' = {}^0\dot{\mathbf{T}}_i {}^i\mathbf{b}' \quad (2.43)$$

其中,

$${}^0\dot{\mathbf{T}}_i = \sum_{j=1}^i \left(\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) \quad (2.44)$$

${}^0\dot{\mathbf{b}}'$ 的第 1~3 个分量表示速度向量的 x 、 y 、 z 分量。其中, 式(2.12)中的 w , 对于 ${}^i\mathbf{b}'$ 来说取 $w=1$ 。 q_j 是关节变量。当关节 j 为旋转关节时, $q_j = \theta_j$; 当其为移动关节时, $q_j = d_j$ 。 $\partial {}^0\mathbf{T}_i / \partial q_j$ 可利用矩阵 \mathbf{A}_j 按下式计算:

$$\frac{\partial {}^0\mathbf{T}_i}{\partial q_j} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_j \mathbf{A}_{j+1} \cdots \mathbf{A}_i \quad (2.45)$$

当 $q_j = \theta_j$ 时, \mathbf{A}_j 为

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

当 $q_j = d_j$ 时, \mathbf{A}_j 为

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

一旦计算出 ${}^0\dot{\mathbf{T}}_i$ 后, 即可求出相对于 Σ_0 的 Σ_i 的速度 \mathbf{v}_i 和角速度 $\boldsymbol{\omega}_i$ 。由式(2.34)可求得

$${}^0\dot{\mathbf{T}}_i = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{n}}_i & \dot{\mathbf{o}}_i & \dot{\mathbf{a}}_i & \dot{\mathbf{p}}_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

根据式(2.48)可以直接求得速度 \mathbf{v}_i

$$\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{p}}_i \quad (2.49)$$

另外, 根据 Σ_i 的角速度 $\boldsymbol{\omega}_i$, 可以计算出式(2.48)中的 $\dot{\mathbf{n}}_i$ 、 $\dot{\mathbf{o}}_i$ 、 $\dot{\mathbf{a}}_i$ 分别为

$$\dot{\mathbf{n}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{n}_i \quad (2.50)$$

$$\dot{\mathbf{o}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{o}_i \quad (2.51)$$

$$\dot{\mathbf{a}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{a}_i \quad (2.52)$$

根据式(2.51), 下式成立:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_i \cdot \dot{\mathbf{o}}_i &= \mathbf{a}_i \cdot (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{o}_i) \\ &= (\mathbf{o}_i \times \mathbf{a}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_i \\ &= \mathbf{n}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \end{aligned} \quad (2.53)$$

同样, 由式(2.52)、式(2.50), 可以分别得出

$$\mathbf{n}_i \cdot \dot{\mathbf{a}}_i = \mathbf{o}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \quad (2.54)$$

$$\mathbf{o}_i \cdot \dot{\mathbf{n}}_i = \mathbf{a}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \quad (2.55)$$

归纳式(2.53)~式(2.55),可得

$$[\mathbf{n}_i \ \mathbf{o}_i \ \mathbf{a}_i]^T \boldsymbol{\omega}_i = [\mathbf{a}_i^T \dot{\mathbf{o}}_i, \mathbf{n}_i^T \dot{\mathbf{a}}_i, \dot{\mathbf{o}}_i^T \dot{\mathbf{n}}_i]^T \quad (2.56)$$

在此,若令

$${}^0\mathbf{O}_i = [\mathbf{n}_i \ \mathbf{o}_i \ \mathbf{a}_i] \quad (2.57)$$

则由于 ${}^0\mathbf{O}_i$ 是正交矩阵(orthogonal matrix),因而得出

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_i &= ({}^0\mathbf{O}_i^T)^{-1} [\mathbf{a}_i^T \dot{\mathbf{o}}_i, \mathbf{n}_i^T \dot{\mathbf{a}}_i, \dot{\mathbf{o}}_i^T \dot{\mathbf{n}}_i]^T \\ &= {}^0\mathbf{O}_i [\mathbf{a}_i^T \dot{\mathbf{o}}_i, \mathbf{n}_i^T \dot{\mathbf{a}}_i, \dot{\mathbf{o}}_i^T \dot{\mathbf{n}}_i]^T \end{aligned} \quad (2.58)$$

3) 加速度和角加速度的计算

各杆件的加速度、角加速度可按下式求得。杆件 i 上的点 \mathbf{b} 相对于 Σ_0 的加速度可以通过对式(2.43)的两边再进行微分而求得,即

$${}^0\dot{\mathbf{b}}' = {}^0\ddot{\mathbf{T}}_i \mathbf{b}' \quad (2.59)$$

式中, ${}^0\ddot{\mathbf{T}}_i$ 由下式给出:

$${}^0\ddot{\mathbf{T}}_i = \sum_{j=1}^i \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}_i}{\partial q_j^2} \dot{q}_j \right) + \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}_i}{\partial q_j \partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right) \quad (2.60)$$

式2.60中右边第二项表示离心加速度(centrifugal acceleration)和哥氏加速度(Coriolis acceleration)。 $\partial^2 \mathbf{T}_i / \partial q_j \partial q_k$ 可利用矩阵 Δ_j, Δ_k 来计算

$$\frac{\partial^2 \mathbf{T}_i}{\partial q_j \partial q_k} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \cdots \Delta_j \mathbf{A}_j \cdots \Delta_k \mathbf{A}_k \cdots \mathbf{A}_i \quad (2.61)$$

右边第一项 $\partial^2 \mathbf{T}_i / \partial q_j^2$ 可以利用式(2.45)来进行计算。

若计算出 ${}^0\ddot{\mathbf{T}}_i$,则可以求出相对于 Σ_0 的 Σ_i 的加速度 $\dot{\mathbf{v}}_i$ 和角速度 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 。由式(2.34)可知下式成立:

$${}^0\ddot{\mathbf{T}}_i = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{n}}_i & \ddot{\mathbf{o}}_i & \ddot{\mathbf{a}}_i & \ddot{\mathbf{p}}_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

由此可以直接求出加速度 $\dot{\mathbf{v}}_i$,即

$$\dot{\mathbf{v}}_i = \ddot{\mathbf{p}}_i \quad (2.63)$$

另外,对式(2.58)的两边进行微分后

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^0\mathbf{O}_i \begin{bmatrix} \mathbf{a}_i^T \ddot{\mathbf{o}}_i \\ \mathbf{n}_i^T \ddot{\mathbf{a}}_i \\ \dot{\mathbf{o}}_i^T \ddot{\mathbf{n}}_i \end{bmatrix} + {}^0\mathbf{O}_i \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{a}}_i^T \dot{\mathbf{o}}_i \\ \dot{\mathbf{n}}_i^T \dot{\mathbf{a}}_i \\ \dot{\mathbf{o}}_i^T \dot{\mathbf{n}}_i \end{bmatrix} \\ &\quad + {}^0\dot{\mathbf{O}}_i \begin{bmatrix} \mathbf{a}_i^T \dot{\mathbf{o}}_i \\ \mathbf{n}_i^T \dot{\mathbf{a}}_i \\ \dot{\mathbf{o}}_i^T \dot{\mathbf{n}}_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.64)$$

把式(2.48)和式(2.62)中的 $\dot{\mathbf{n}}_i, \dot{\mathbf{o}}_i, \dot{\mathbf{a}}_i, \ddot{\mathbf{n}}_i, \ddot{\mathbf{o}}_i, \ddot{\mathbf{a}}_i$ 代入式(2.64)后即可求得 $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 。

按照上述过程,即可求出相对于 Σ_0 的 Σ_i 的位置、姿态、速度、角速度、加速度、角加速度的正运动学方程式。在这个计算中,必须进行 ${}^0\mathbf{T}, {}^0\dot{\mathbf{T}}, {}^0\ddot{\mathbf{T}}_i$ 的计算。进行这样的计算若用下面的递推公式效果会更好^[9]。

$${}^0\mathbf{T}_i = {}^0\mathbf{T}_{i-1} \mathbf{A}_i \quad (2.65)$$

$${}^0\dot{\mathbf{T}}_i = {}^0\dot{\mathbf{T}}_{i-1} \mathbf{A}_i + {}^0\mathbf{T}_{i-1} \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} {}^0\ddot{\mathbf{T}}_i &= {}^0\ddot{\mathbf{T}}_{i-1} \mathbf{A}_i + 2 {}^0\dot{\mathbf{T}}_{i-1} \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial q_i} \dot{q}_i \\ &\quad + {}^0\mathbf{T}_{i-1} \frac{\partial^2 \mathbf{A}_i}{\partial q_i^2} \dot{q}_i^2 + {}^0\mathbf{T}_{i-1} \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial q_i} \ddot{q}_i \end{aligned} \quad (2.67)$$

$\partial \mathbf{A}_i / \partial q_i$ 可利用 Δ_i 来计算

$$\frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial q_i} = \Delta_i \mathbf{A}_i \quad (2.68)$$

2. 向量法

关于各杆件的位置、姿态、速度、角速度、加速度、角加速度,即相对于 Σ_0 的 Σ_i 的位置、姿态、速度、角速度、加速度、角加速度,通过用向量的几何学方法也可以进行计算。而且在以下的计算中, Σ_i 是用 Denavit-Hartenberg 方法所设定的。

表示相对于 Σ_0 的 Σ_i 的姿态向量 $\mathbf{n}_i, \mathbf{o}_i, \mathbf{a}_i$,可用下面的递推公式求得:

$$[\mathbf{n}_i \ \mathbf{o}_i \ \mathbf{a}_i] = [\mathbf{n}_{i-1} \ \mathbf{o}_{i-1} \ \mathbf{a}_{i-1}] {}^{i-1}\mathbf{O}_i \quad (2.69)$$

式中, ${}^{i-1}\mathbf{O}_i$ 是用下式定义的旋转变换矩阵:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}\mathbf{O}_i & {}^{i-1}\mathbf{l}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

相对于 Σ_0 的 Σ_i 的位置向量 \mathbf{p}_i ,可根据图2.30所示的关系进行计算

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_{i-1} + \mathbf{l}_i \quad (2.71)$$

只要各向量未被特别指定,都认为它们是相对于 Σ_0 的。 \mathbf{l}_i 是由 Σ_{i-1} 的原点至 Σ_i 的原点的向量,可以根据式(2.70)的 ${}^{i-1}\mathbf{l}_i$ 按下式计算:

$$\mathbf{l}_i = [\mathbf{n}_{i-1} \ \mathbf{o}_{i-1} \ \mathbf{a}_{i-1}] {}^{i-1}\mathbf{l}_i \quad (2.72)$$

式(2.72)中的 $[\mathbf{n}_{i-1} \ \mathbf{o}_{i-1} \ \mathbf{a}_{i-1}]$ 可根据式(2.69)来计算。因此,若对式(2.69)、式(2.71)和式(2.72)进行迭代计算,即可求得各杆件的位置和姿态。

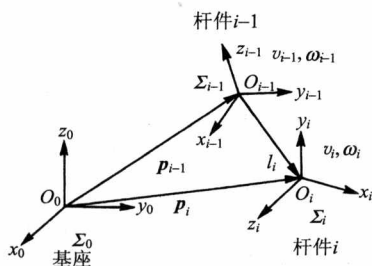


图 2.30 杆件坐标系之间的关系

相对于 Σ_0 的 Σ_i 的角速度 ω_i 可根据 Σ_{i-1} 相对于 Σ_0 的角速度 ω_{i-1} 来计算

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta\omega_i \quad (2.73)$$

$\Delta\omega_i$ 是相对于 Σ_{i-1} 的 Σ_i 的相对角速度, 根据关节速度按下式求得:

$$\Delta\omega_i = \begin{cases} a_{i-1} \dot{\theta}_i & (\text{旋转时}) \\ 0 & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.74)$$

式中, a_{i-1} 为关节 i 的旋转或移动轴的单位向量。若把式(2.74)代入式(2.73)中, 可得

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{i-1} + a_{i-1} \dot{\theta}_i & (\text{旋转时}) \\ \omega_{i-1} & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.75)$$

Σ_i 相对于 Σ_0 的速度 v_i 可以通过对式(2.71)的两边进行时间微分而求得, 其结果是

$$v_i = v_{i-1} + \omega_{i-1} \times l_i + \frac{d^* l_i}{dt} \quad (2.76)$$

式中, 右边的第二项和第三项表示 l_i 的时间微分, 即

$$l_i = \omega_{i-1} \times l_i + \frac{d^* l_i}{dt} \quad (2.77)$$

$\omega_{i-1} \times l_i$ 表示由于 Σ_{i-1} 的旋转所产生的速度, $d^* l_i / dt$ 表示 l_i 相对于 Σ_{i-1} 的速度。像 Σ_{i-1} 这样运动的坐标系被称为移动坐标系(moving coordinate system)。值得注意的是, 移动坐标系上的向量速度, 如式(2.77)的右边第一项那样, 它包含了伴随坐标系旋转的速度分量。 $d^* l_i / dt$ 可根据关节速度求出

$$\frac{d^* l_i}{dt} = \begin{cases} (a_{i-1} \dot{\theta}_i) \times l_i & (\text{旋转时}) \\ a_{i-1} \dot{d}_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.78)$$

把式(2.78)代入式(2.76)中, 并考虑式(2.75)后进行整理, 可得

$$v_i = \begin{cases} v_{i-1} + \omega_i \times l_i & (\text{旋转时}) \\ v_{i-1} + \omega_i \times l_i + a_{i-1} \dot{d}_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.79)$$

若将式(2.73)的两边对时间进行微分,

可求得 Σ_i 相对于 Σ_0 的角加速度

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \Delta\dot{\omega}_i \quad (2.80)$$

在此, 若把 $\Delta\dot{\omega}_i$ 这一项分解成因 Σ_{i-1} 的旋转而产生的分量 $\omega_{i-1} \times \Delta\omega_i$ 和因 Σ_i 相对于 Σ_{i-1} 的相对旋转而产生的分量 $d^* \omega_i / dt$, 则式(2.80)可写成

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \omega_{i-1} \times \Delta\omega_i + \frac{d^* \Delta\omega_i}{dt} \quad (2.81)$$

$d^* \Delta\omega_i / dt$ 由下式求出:

$$\frac{d^* \Delta\omega_i}{dt} = \begin{cases} a_{i-1} \ddot{\theta}_i & (\text{旋转时}) \\ 0 & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.82)$$

若把式(2.74)和式(2.82)代入式(2.81)中, 即可得

$$\dot{\omega}_i = \begin{cases} \dot{\omega}_{i-1} + \omega_{i-1} \times (a_{i-1} \dot{\theta}_i) + a_{i-1} \ddot{\theta}_i & (\text{旋转时}) \\ \dot{\omega}_{i-1} & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.83)$$

Σ_i 相对于 Σ_0 的加速度, 可以通过将式(2.76)的两边对时间进行微分而求得。考虑到式(2.77)后, 可得出

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= \dot{v}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times l_i + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times l_i) \\ &\quad + 2\omega_{i-1} \times \frac{d^* l_i}{dt} + \frac{d^* \dot{l}_i}{dt^2} \end{aligned} \quad (2.84)$$

另外, 把式(2.78)相对于 Σ_{i-1} 进行时间微分, 可得

$$\frac{d^* \dot{l}_i}{dt^2} = \begin{cases} (a_{i-1} \ddot{\theta}_i) \times [(a_{i-1} \dot{\theta}_i) \times l_i] \\ \quad + (a_{i-1} \ddot{\theta}_i) \times l_i & (\text{旋转时}) \\ a_{i-1} \ddot{d}_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.85)$$

若将式(2.78)和(2.85)代入式(2.84)中, 并考虑式(2.75)后加以整理, 可得

$$\dot{v}_i = \begin{cases} \dot{v}_{i-1} + \dot{\omega}_i \times l_i + \omega_i \times (\omega_i \times l_i) & (\text{旋转时}) \\ \dot{v}_{i-1} + \dot{\omega}_i \times l_i + \omega_i \times (\omega_i \times l_i) \\ \quad + 2\omega_i \times (a_{i-1} \dot{d}_i) + a_{i-1} \ddot{d}_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.86)$$

通过以上导出的递推式(2.75)、式(2.79)、式(2.83)和式(2.86), 可以迭代计算出各杆件的速度、角速度、加速度和角加速度。不过, 如果将各向量用下角的坐标系表示, 则 a_{i-1} 和 l_i 将变成常数向量, 这样计算就更方便了。因此, 用式(2.70)的旋转变换矩阵 ${}^{i-1}O_i$, 把各向量变换为其下角的坐标系。其结果是, 计算速度、角速度的递推式将成为

如下形式:

$${}^i\omega_i = \begin{cases} {}^{i-1}O_i^T({}^{i-1}\omega_{i-1} + {}^{i-1}a_{i-1}\dot{\theta}_i) & (\text{旋转时}) \\ {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}\omega_{i-1} & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.87)$$

$${}^i v_i = \begin{cases} {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}v_{i-1} + {}^i\omega_i \times {}^i l_i & (\text{旋转时}) \\ {}^{i-1}O_i^T({}^{i-1}v_{i-1} + {}^{i-1}a_{i-1}\dot{d}_i) + {}^i\omega_i \times {}^i l_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.88)$$

计算加速度、角加速度的递推式成为如下形式:

$${}^i\dot{\omega}_i = \begin{cases} {}^{i-1}O_i^T[{}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}a_{i-1}\dot{\theta}_i) + {}^{i-1}a_{i-1}\ddot{\theta}_i] & (\text{旋转时}) \\ {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}\dot{\omega}_{i-1} & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.89)$$

$${}^i\dot{v}_i = \begin{cases} {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}\dot{v}_{i-1} + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i l_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i l_i) & (\text{旋转时}) \\ {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}\dot{v}_{i-1} + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i l_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i l_i) + 2{}^i\omega_i \times ({}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}a_{i-1}\dot{d}_i) + {}^{i-1}O_i^{T^{i-1}}a_{i-1}\ddot{d}_i & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.90)$$

式中,向量的左上角表示该向量值所对应的杆件坐标系的编号(如 Σ_i 的 i)。式(2.87)~式(2.90)成为计算手臂动力学的基本公式^[10](参阅第3篇2.3节)。

2.2.3 雅可比矩阵的计算

1. 雅可比矩阵的定义

描述作业中末端执行器的位置和姿态的参数称为作业坐标(task coordinates)。把作业坐标作为分量的向量,通常可写作

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T \quad (2.91)$$

式中, r 为作业向量(task vector), m 为作业坐标数。通常, r 定义为

$$r = [{}^r p_h^T \quad {}^r \phi_h^T]^T \quad (2.92)$$

式中, ${}^r p_h$ 为表示末端执行器相对于参考坐标系 Σ_r 的位置向量; ${}^r \phi_h$ 为表示姿态的伪向量。如前所述,当 ${}^r \phi_h$ 表示欧拉角或横摇角、纵摇角、偏转角时,它已不再是向量。含有这样的 ${}^r \phi_h$ 的 r 称为伪向量^[3]。

作业向量是关节变量的函数。关节变量的向量通常为

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \quad (2.93)$$

式中, n 为关节数,即手臂的自由度数。 r 可

以根据 q 来进行计算

$$r = R(q) \quad (2.94)$$

通常, $n=m$,但也有 $n>m$ 的情况。 $n>m$ 的手臂称为冗余自由度手臂(redundant arm)(参阅文献[11],[12])。函数 $R(q)$ 一般是非线性(nonlinear)的。

雅可比矩阵(Jacobian matrix)是将式(2.94)表示的函数进行局部线性化处理而得到的变换矩阵。若设雅可比矩阵为 J_h ,则 J_h 由下式定义:

$$\dot{r} = J_h \dot{q} \text{ 或者 } \delta r = J_h \delta q \quad (2.95)$$

于是

$$J_h = \frac{dR}{dq} = \left[\frac{\partial R_i}{\partial q_j} \right] \quad (2.96)$$

虽然由式(2.95)可以直接定义雅可比矩阵,但从表示 r 的式(2.92)中,我们很难从直观上去理解对姿态角分量 ${}^r \phi_h$ 进行的微分到底意味着什么。

因此,可以换一个角度定义雅可比矩阵,即着眼于末端执行器的速度和角速度(或微位移和微旋转)。若将相对于参考坐标系 Σ_r 的末端执行器的速度和角速度分别设为 ${}^r v_h$ 和 ${}^r \omega_h$,把由 ${}^r v_h$ 和 ${}^r \omega_h$ 构成的速度向量设为

$$s = [{}^r v_h^T \quad {}^r \omega_h^T]^T \quad (2.97)$$

则雅可比矩阵 J_s 可定义为

$$s = J_s \dot{q} \quad (2.98)$$

当作业向量用式(2.92)进行定义时,式(2.98)中的 J_s 和式(2.95)中的 J_h 之间具有下面的关系:

$$J_s = N J_h \quad (2.99)$$

其中,

$$N = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & N_0 \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

I_3 是 3×3 的单位矩阵(unit matrix); N_0 是把 ${}^r \phi_h$ 的微分变换为角速度 ${}^r \omega_h$ 的 3×3 的矩阵。 N_0 的形式由 ${}^r \phi_h$ 的定义来决定。

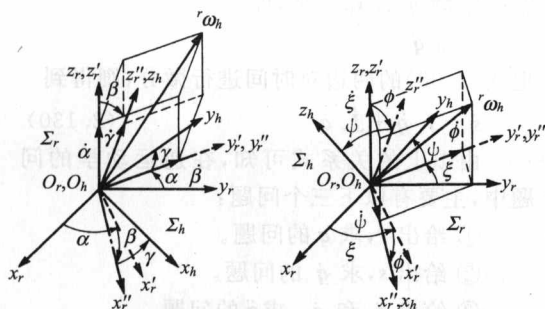
若用欧拉角或用横摇角、纵摇角、偏转角来分别定义 ${}^r \phi_h$,则如图2.31(a)和(b)所示, ${}^r \phi_h$ 的微分可以看成是以图2.31中的斜交坐标系(oblique coordinate system)表示的 ${}^r \omega_h$ 的分量。欧拉角的微分 $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$,分别表示 z_r 轴、 y_r' 轴、 z_r'' 轴方向的速度分量。横摇角、纵摇角、偏转角的微分 $\dot{\xi}, \dot{\phi}, \dot{\psi}$ 则分别表示 z_r 轴、 y_r' 轴、 x_r'' 轴方向的速度分量。如果按照有关 ${}^r \phi_h$ 各自的定义由 N_0 来进行计算, ${}^r \phi_h$ 分别为欧拉

角 α, β, γ 时,有

$$N_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha\sin\beta \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha\sin\beta \\ 1 & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (2.101)$$

当横摇角、纵摇角、偏转角分别为 ξ, ϕ, ψ 时

$$N_0 = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\xi & \cos\xi\cos\phi \\ 0 & \cos\xi & \sin\xi\cos\phi \\ 1 & 0 & -\sin\phi \end{bmatrix} \quad (2.102)$$



(a) 欧拉角 (b) 横摇角、纵摇角、偏转角

图 2.31 利用斜交坐标系表示 ${}^r\omega_h$ 的分量

2. 用齐次变换法计算雅可比矩阵

将式(2.36)的第一个等号两边对时间进行微分,可得

$$\begin{aligned} {}^r\dot{H}_h &= {}^rH_0 {}^0\dot{T}_n {}^nH_h \\ &= \sum_{j=1}^n ({}^rH_0 {}^0T_n {}^jH_h) \dot{q}_j \end{aligned} \quad (2.103)$$

式中, 0T_n 是由

$${}^0T_n^j = \frac{\partial {}^0T_n}{\partial q_j} \quad (2.104)$$

所定义的矩阵,它和式(2.45)一样,可以用式(2.46)或式(2.47)的矩阵 A_j 来进行计算,即

$${}^0T_n^j = A_1 A_2 \cdots A_j A_{j+1} \cdots A_n \quad (2.105)$$

另外,若 rH_h 用末端执行器的位置、姿态向量 ${}^r p_h, {}^r n_h, {}^r o_h, {}^r a_h$ 来表示,可以给出如式(2.36)所示的第二个等号右边的形式,将它对时间进行微分后可得下式:

$${}^r\dot{H}_h = \begin{bmatrix} {}^r\dot{n}_h & {}^r\dot{o}_h & {}^r\dot{a}_h & {}^r\dot{p}_h \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

另外,设

$${}^rH_0 {}^0T_n {}^jH_h = \begin{bmatrix} {}^r n_h^j & {}^r o_h^j & {}^r a_h^j & {}^r p_h^j \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

并把 J_n, J_o, J_a, J_p 定义为

$$J_n = [{}^r n_h^1 \quad {}^r n_h^2 \quad \cdots \quad {}^r n_h^n] \quad (2.108)$$

$$J_o = [{}^r o_h^1 \quad {}^r o_h^2 \quad \cdots \quad {}^r o_h^n] \quad (2.109)$$

$$J_a = [{}^r a_h^1 \quad {}^r a_h^2 \quad \cdots \quad {}^r a_h^n] \quad (2.110)$$

$$J_p = [{}^r p_h^1 \quad {}^r p_h^2 \quad \cdots \quad {}^r p_h^n] \quad (2.111)$$

则由式(2.103)和式(2.107)可得下列各式:

$${}^r\dot{n}_h = J_n \dot{q} \quad (2.112)$$

$${}^r\dot{o}_h = J_o \dot{q} \quad (2.113)$$

$${}^r\dot{a}_h = J_a \dot{q} \quad (2.114)$$

$${}^r\dot{p}_h = J_p \dot{q} \quad (2.115)$$

如果求得 ${}^r\dot{n}_h, {}^r\dot{o}_h, {}^r\dot{a}_h$, 则由式(2.58)可以计算出末端执行器的角速度 ${}^r\omega_h$, 即

$${}^r\omega_h = {}^rO_h [{}^r a_h^T {}^r\dot{o}_h, {}^r n_h^T {}^r\dot{a}_h, {}^r o_h^T {}^r\dot{n}_h]^T \quad (2.116)$$

式中, rO_h 为由式(2.14)所定义的旋转变换矩阵, 即

$${}^rO_h = [{}^r n_h \quad {}^r o_h \quad {}^r a_h]$$

由于有 ${}^r v_h = {}^r \dot{p}_h$, 因此由式(2.97)、式(2.98)、式(2.112)~式(2.116), 可以求得 J_s 为

$$J_s = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & {}^rO_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_p \\ {}^r a_h^T J_o \\ {}^r n_h^T J_a \\ {}^r o_h^T J_n \end{bmatrix} \quad (2.117)$$

由式(2.99)即可求得 J_h 为

$$J_h = N^{-1} J_s \quad (2.118)$$

3. 用向量计算雅可比矩阵

当 \dot{q} 的第 j 个分量 \dot{q}_j 是 1、其他分量均为 0 时, 若分别设所产生的末端执行器的速度和角速度为 ${}^r v_h^j$ 和 ${}^r \omega_h^j$, 则 J_s 可以表示如下:

$$J_s = \begin{bmatrix} {}^r v_h^1 & {}^r v_h^2 & \cdots & {}^r v_h^n \\ {}^r \omega_h^1 & {}^r \omega_h^2 & \cdots & {}^r \omega_h^n \end{bmatrix} \quad (2.119)$$

由此, 求 J_s 的问题就转变成求 ${}^r v_h^j, {}^r \omega_h^j$ 的问题。根据 \dot{q}_j 是旋转还是平移, ${}^r v_h^j$ 和 ${}^r \omega_h^j$ 分别按下式进行计算:

$${}^r v_h^j = \begin{cases} {}^r a_{j-1} \times {}^r p_{h,j-1} & (\text{旋转时}) \\ {}^r a_{j-1} & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.120)$$

$${}^r \omega_h^j = \begin{cases} {}^r a_{j-1} & (\text{旋转时}) \\ 0 & (\text{移动时}) \end{cases} \quad (2.121)$$

式中, ${}^r a_{j-1}$ 为关节 j 的旋转或移动轴方向的单位向量; ${}^r p_{h,j-1}$ 是从 Σ_{j-1} 的原点至 Σ_h 的原点的向量。

为了用式 (2.120) 和式 (2.121) 来计算 ${}^r v_h^j$ 、 ${}^r \omega_h^j$, 必须计算出 ${}^r a_{j-1}$ 和 ${}^r p_{h,j-1}$ 。从原理上说, 可根据第 3 篇 2.2.2 节的 1. 或 2. 中所叙述的方法计算来 ${}^r a_{j-1}$ 、 ${}^r p_{h,j-1}$, 但如何能够更高效地进行这样的计算还是一个问题。

对此, 下面提出一个能高效率求得 ${}^r v_h^j$ 和 ${}^r \omega_h^j$ 的方法^[13,14], 即不直接计算 ${}^r a_{j-1}$ 和 ${}^r p_{h,j-1}$, 而是采用第 3 篇 2.2.2 节所导出的正运动学关系式 (2.87) 和式 (2.88) 来进行计算。首先, 令

$${}^{j-1} v_{j-1} = {}^{j-1} \omega_{j-1} = 0 \quad (2.122)$$

对于

$$\dot{q}_j = 1 \quad (2.123)$$

求 ${}^j v_j$ 、 ${}^j \omega_j$ 。接着, 对于 $k = j+1, j+2, \dots, n$, 设

$$\dot{q}_k = 0 \quad (2.124)$$

依次求得 ${}^k v_k$ 、 ${}^k \omega_k$ 。根据这样所得到的 ${}^n v_n$ 、 ${}^n \omega_n$, 由下式求得 ${}^h v_h^j$ 、 ${}^h \omega_h^j$:

$${}^h v_h^j = {}^n O_h^T {}^n v_n + {}^h \omega_h^j \times ({}^n O_h^T {}^n l_h) \quad (2.125)$$

$${}^h \omega_h^j = {}^n O_h^T {}^n \omega_n \quad (2.126)$$

式中, ${}^n O_h$ 为 ${}^n H_h$ 的旋转分量; ${}^n l_h$ 为平移分量。 ${}^n H_h$ 可以用下式表示:

$${}^n H_h = \begin{bmatrix} {}^n O_h & {}^n l_h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.127)$$

然后, 将这样计算得出的 ${}^h v_h^j$ 和 ${}^h \omega_h^j$, 用式 (2.14) 中的 ${}^r O_h$ 进行坐标变换, 表示为 Σ_r 的量, 就可以得到 ${}^r v_h^j$ 和 ${}^r \omega_h^j$ 。即

$${}^r v_h^j = {}^r O_h {}^h v_h^j \quad (2.128)$$

$${}^r \omega_h^j = {}^r O_h {}^h \omega_h^j \quad (2.129)$$

2.2.4 逆运动学的解法

1. 逆运动学问题

所谓逆运动学 (inverse kinematics), 是指给出杆件的位置、姿态、速度、角速度、加速度和角加速度, 求解能实现这些要求的关节变量的位置、速度、加速度。逆运动学简称为 IK。实际上, 在机器人手臂的控制中, 对终端杆件, 即对末端执行器的位置、姿态、速度、角速度、加速度和角加速度的控制是主要问题, 所以在逆运动学问题中, 主要是由末端执行器的位置、姿态、速度、角速度、加速度和角加

速度求出关节变量的位置、速度、加速度。下面就此问题进行叙述。

如式 (2.94) 所示, 表示末端执行器的位置和姿态的向量 (或伪向量) r , 可根据表示关节变量的向量 q 计算出来, 即

$$r = R(q)$$

如式 (2.98) 所示, 表示末端执行器的速度和角速度的向量 s , 可以由表示关节变量速度的向量 \dot{q} 计算出来, 即

$$s = J_s \dot{q}$$

把式 (2.98) 的两边对时间进行微分, 则得到

$$\dot{s} = J_s \ddot{q} + \dot{J}_s \dot{q} \quad (2.130)$$

由以上的关系式可知, 在逆运动学的问题中, 主要有以下三个问题:

- ① 给出 r , 求 q 的问题。
- ② 给出 s , 求 \dot{q} 的问题。
- ③ 给出 \dot{s} 和 \dot{q} , 求 \ddot{q} 的问题。

给出 r 求 q 的问题是逆坐标变换 (inverse coordinate transformation) 问题; 给出 s 求 \dot{q} 的问题, 是在分解速度控制 (resolved motion rate control)^[15] 中必须求解的问题, 称为分解速度问题; 给出 \dot{s} 和 \dot{q} 求 \ddot{q} 的问题, 是在分解加速度控制 (resolved acceleration control)^[16] 中必须求解的问题, 称为分解加速度问题。

在逆坐标变换问题中, 一般不存在解析解。所谓的解一般都用数值解法求得。但大部分工业机器人的手臂, 存在着特定的解析解。对于各种手臂提出了各种解析解的求解方法^[6, 17~19], 解析解通常有若干个。解析解法及数值解法, 将在本节 2.~4. 中加以讲解。

分解速度问题, 从原理上是数值求解 J_s 的逆矩阵, 再把它乘以 s 即可求解

$$\dot{q} = J_s^{-1} s \quad (2.131)$$

但与其分为上述两步进行计算, 不如用消去法等直接求解式 (2.98), 这样在计算量方面会更节省时间。至于说冗余自由度手臂, 由于它的 J_s 不是方阵, 其解法可以参阅文献^{[11], [12]}。若 J_s 不是正则矩阵, 则可以计算一种伪矩阵^[11, 20]。另外, 对于 6 个自由度的手臂, 还提出了一种求解式 (2.131) 的解析法^[21]。

分解加速度问题, 根据式 (2.130) 可以按下式求解:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_s^{-1}(\ddot{\mathbf{s}} - \dot{\mathbf{J}}_s \dot{\mathbf{q}}) \quad (2.132)$$

这样,这个问题就分解为求 \mathbf{J}_s 的逆矩阵问题和求 $\dot{\mathbf{J}}_s \dot{\mathbf{q}}$ 的问题。前者的问题和分解速度问题相同。后者的问题,即求 $\dot{\mathbf{J}}_s \dot{\mathbf{q}}$ 的问题,相当于求离心加速度和哥氏加速度的问题,用正运动学方程即可求解^[14]。

2. 齐次变换的逆坐标变换解析解法

这里以第3篇2.2.1节中的5.讲述的机器人手臂(D-ARM)为例,介绍计算逆坐标变换的解析解^[6]的方法。但是, $\theta_i (i=1\sim 6)$ 的范围限制在 $-180^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ 之间。

当作业向量 \mathbf{r} 如式(2.92)所给出时,按照 \mathbf{p}_h 的定义,通过用式(2.23)或式(2.24),可计算出式(2.36)左边的 ${}^r\mathbf{H}_h$ 为:

$${}^r\mathbf{H}_h = \begin{bmatrix} {}^r\mathbf{n}_h(\mathbf{p}_h) & {}^r\mathbf{o}_h(\mathbf{p}_h) & {}^r\mathbf{a}_h(\mathbf{p}_h) & {}^r\mathbf{p}_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.133)$$

从而,由式(2.36)可以计算出 ${}^0\mathbf{T}_6$ 为:

$${}^0\mathbf{T}_6 = {}^r\mathbf{H}_0^{-1} {}^r\mathbf{H}_h {}^n\mathbf{H}_h^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_6 & \mathbf{o}_6 & \mathbf{a}_6 & \mathbf{p}_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.134)$$

${}^r\mathbf{H}_0$ 、 ${}^n\mathbf{H}_h$ 是已知的常数矩阵。 \mathbf{n}_6 、 \mathbf{o}_6 、 \mathbf{a}_6 、 \mathbf{p}_6 是相对于 Σ_0 的向量,这些向量的左上角被省略。以下凡是表示在 Σ_0 中的向量,其左上角均省略。

另外,由式(2.26)~式(2.31), ${}^0\mathbf{T}_6$ 按下式计算:

$${}^0\mathbf{T}_6 = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_3 \mathbf{A}_4 \mathbf{A}_5 \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.135)$$

其中,

$$t_{11} = C_1 [C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 C_6) - S_{23} S_5 C_6] + S_1 (S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6) \quad (2.136)$$

$$t_{21} = S_1 [C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 C_6) - S_{23} S_5 C_6] - C_1 (S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6) \quad (2.137)$$

$$t_{31} = S_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 C_6) + C_{23} S_5 C_6 \quad (2.138)$$

$$t_{12} = C_1 [-C_{23} (C_4 C_5 S_6 + S_4 C_6) + S_{23} S_5 S_6] + S_1 (-S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6) \quad (2.139)$$

$$t_{22} = S_1 [-C_{23} (C_4 C_5 S_6 + S_4 C_6) + S_{23} S_5 S_6] - C_1 (-S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6) \quad (2.140)$$

$$t_{32} = -S_{23} (C_4 C_5 S_6 + S_4 C_6) - C_{23} S_5 S_6 \quad (2.141)$$

$$t_{13} = C_1 (C_{23} C_4 S_5 + S_{23} C_5) + S_1 S_4 S_5 \quad (2.142)$$

$$t_{23} = S_1 (C_{23} C_4 S_5 + S_{23} C_5) - C_1 S_4 S_5 \quad (2.143)$$

$$t_{33} = S_{23} C_4 S_5 - C_{23} C_5 \quad (2.144)$$

$$t_{14} = C_1 (a_2 C_2 + d_4 S_{23}) \quad (2.145)$$

$$t_{24} = S_1 (a_2 C_2 + d_4 S_{23}) \quad (2.146)$$

$$t_{34} = a_2 S_2 - d_4 C_{23} \quad (2.147)$$

并令 $C_i = \cos \theta_i$, $S_i = \sin \theta_i$, $C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$, $S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ 。

比较式(2.134)和式(2.135)中的第4列,由式(2.145)~式(2.147)得到

$$p_{6x} = C_1 (a_2 C_2 + d_4 S_{23}) \quad (2.148)$$

$$p_{6y} = S_1 (a_2 C_2 + d_4 S_{23}) \quad (2.149)$$

$$p_{6z} = a_2 S_2 - d_4 C_{23} \quad (2.150)$$

p_{6x} 、 p_{6y} 、 p_{6z} 分别是 \mathbf{p}_6 的 x 、 y 、 z 分量。由式(2.148)和式(2.149)可以求出 θ_1 的两个解,即

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_{10} & (k_1 = +1) \\ \theta_{10} - \pi \operatorname{sgn} \theta_{10} & (k_1 = -1) \end{cases} \quad (2.151)$$

其中,

$$\theta_{10} = \arg(p_{6x}, p_{6y}) \quad (2.152)$$

$$k_1 = \operatorname{sgn}(a_2 C_2 + d_4 S_{23}) \quad (2.153)$$

这样的关系示于图2.32(a)中。

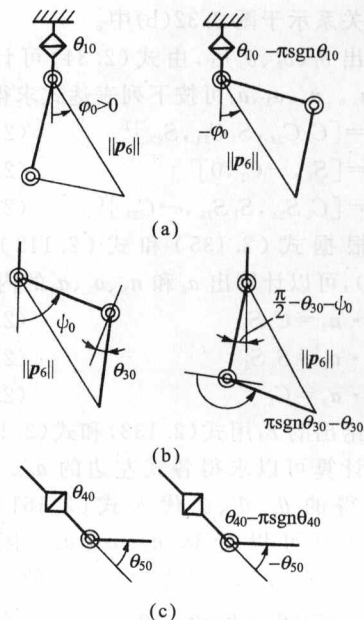


图 2.32 逆坐标变换解的种类

另外,如表 2.2 所示,D-ARM 的 $a_2 = d_4 = 300\text{mm}$,若令 $a_2 = d_4 = l_1$,由式(2.148)~式(2.150)即可求出 C_2 、 S_2 、 S_3 如下:

$$C_2 = \frac{k_1 \sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2} + p_{6z} \tan\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right)}{2l_1} \quad (2.154)$$

$$S_2 = \frac{-k_1 \sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2} \tan\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + p_{6z}}{2l_1} \quad (2.155)$$

$$S_3 = \frac{p_{6x}^2 + p_{6y}^2 + p_{6z}^2}{2l_1^2} - 1 \quad (2.156)$$

从而,若令

$$\theta_{30} = \arcsin\left(\frac{p_{6x}^2 + p_{6y}^2 + p_{6z}^2}{2l_1^2} - 1\right) \quad (2.157)$$

$$k_2 = \text{sgn}(C_3) \quad (2.158)$$

则由式(2.156),可以求出 θ_3 有两个解,即

$$\theta_3 = \begin{cases} \theta_{30} & (k_2 = +1) \\ \pi \text{sgn}\theta_{30} - \theta_{30} & (k_2 = -1) \end{cases} \quad (2.159)$$

相对于 θ_3 的每个解,由式(2.154)、式(2.155)可以求得 θ_2 的解为

$$\theta_2 = \arg \left[k_1 \sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2} + p_{6z} \tan\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) - k_1 \sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2} \tan\left(\frac{\theta_3}{2} - \frac{\pi}{4}\right) + p_{6z} \right] \quad (2.160)$$

以上的关系示于图 2.32(b)中。

求出 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 后,由式(2.34)可计算出 n_3 、 o_3 、 a_3 。 n_3 、 o_3 、 a_3 可按下列表达式求得

$$n_3 = [C_1 C_{23}, S_1 C_{23}, S_{23}]^T \quad (2.161)$$

$$o_3 = [S_1, -C_1, 0]^T \quad (2.162)$$

$$a_3 = [C_1 S_{23}, S_1 S_{23}, -C_{23}]^T \quad (2.163)$$

于是,根据式(2.135)和式(2.142)~式(2.144),可以计算出 a_6 和 n_3 、 o_3 、 a_3 的内积

$$a_6 \cdot n_3 = C_4 S_5 \quad (2.164)$$

$$a_6 \cdot o_3 = S_4 S_5 \quad (2.165)$$

$$a_6 \cdot a_3 = C_5 \quad (2.166)$$

再根据给出的 r ,用式(2.133)和式(2.134)通过数值计算可以求得各式左边的 a_6 。另外,把所求得的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 代入式(2.161)~式(2.163)中可以计算 n_3 、 o_3 、 a_3 。因为式(2.164)~式(2.166)的左边是已知的,若设

$$\theta_{40} = \arg(a_6 \cdot n_3, a_6 \cdot o_3) \quad (2.167)$$

$$\theta_{50} = \arccos(a_6 \cdot a_3) \quad (2.168)$$

$$k_3 = \text{sgn}(S_5) \quad (2.169)$$

则可求得 θ_4 、 θ_5 的两个解,即

$$[\theta_4, \theta_5]^T = \begin{cases} [\theta_{40}, \theta_{50}]^T & (k_3 = +1) \\ [\theta_{40} - \pi \text{sgn}\theta_{40}, -\theta_{50}]^T & (k_3 = -1) \end{cases} \quad (2.170)$$

这样的关系如图 2.32(c)所示。

在求得 θ_1 、 θ_2 、 \dots 、 θ_5 后,由式(2.34)可以计算出 n_5 、 o_5 。 n_5 、 o_5 的解析解是

$$n_5 = \begin{bmatrix} C_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) + S_1S_4C_5 \\ S_1(C_{23}C_4C_5 - S_{23}S_5) - C_1S_4C_5 \\ S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5 \end{bmatrix} \quad (2.171)$$

$$o_5 = \begin{bmatrix} -C_1C_{23}S_4 + S_1C_4 \\ -S_1C_{23}S_4 - C_1C_4 \\ -S_{23}S_4 \end{bmatrix} \quad (2.172)$$

从而,由式(2.135)~式(2.138)可以计算出 n_6 和 n_5 、 o_5 的内积为

$$n_6 \cdot n_5 = C_6 \quad (2.173)$$

$$n_6 \cdot o_5 = S_6 \quad (2.174)$$

因为左边的 n_6 、 n_5 、 o_5 是已知的,故由式(2.173)和式(2.174)即可求得 θ_6 的解为

$$\theta_6 = \arg(n_6 \cdot n_5, n_6 \cdot o_5) \quad (2.175)$$

这样,可以求得 q (在本例中, $q_i = \theta_i$) 对应于 r 的解。即使把 θ_i ($i=1\sim6$) 限于 $-180^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ 的范围内,也有 8 组解。即在这个例子中,逆坐标变换的映射(mapping) $r \rightarrow q$ 将是 1 对应于 8。把这个情况示于图 2.33 中,则对应于 r 的 q 的空间可折成八层的图形来表现。弯折处就表示奇异点(参阅第 3 篇 2.2.5 节)。

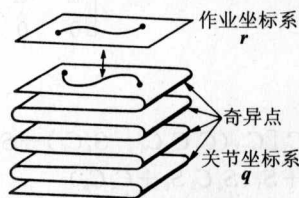


图 2.33 多值函数的逆坐标变换

由逆坐标变换的推导过程可知,映射的这种性质取决于杆件机构的性质。通常,多关节手臂都存在若干个逆变换解,而并不仅限于这个例子。

3. 向量的逆坐标变换解析解法

逆坐标变换的解也可以通过向量的几何学方法求得。为了便于和使用齐次变换矩阵

解法进行比较,取与2. 相同的D-ARM手臂为例来求解其解析解。

在给出 r 后,由式(2.133)可以求得表示 Σ_h 位置和姿态的向量 p_h 、 n_h 、 o_h 、 a_h 。式中,令各个向量都是以 Σ_0 为基准的量。由此,参考图2.34的几何学关系,即可求得手腕(Σ_6 的原点)的位置向量 p_6 为

$$p_6 = p_h - l_3 a_h \quad (2.176)$$

式中, l_3 为从 Σ_6 的原点至 Σ_h 的原点的距离。由图2.34的关系可知, θ_1 和式(2.151)、式(2.152)一样,可以求得两个解,即

$$\theta_1 = \theta_{10} \text{ 或者 } \theta_{10} - \pi \quad (2.177)$$

$$\theta_{10} = \arg(p_{6x}, p_{6y}) \quad (2.178)$$

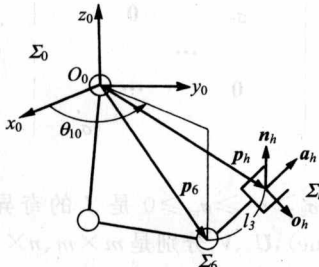


图 2.34 确定 θ_1

下面,再利用图2.35求 θ_2 、 θ_3 的解。在D-ARM中,因 $a_2 = d_4 = l_1$,故可求得图2.35中的 ϕ_1 、 ϕ_2 (图2.35中均为正)为

$$\phi_1 = \arg(\sqrt{p_{6x}^2 + p_{6y}^2}, -p_{6z}) \quad (2.179)$$

$$\phi_2 = 2\arccos(\|p_6\|/2l_1) \quad (2.180)$$

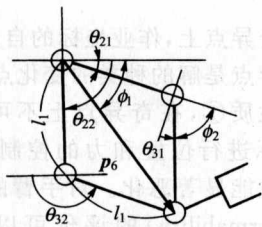


图 2.35 确定 θ_2 、 θ_3

由此可以求得图2.35中的 θ_{21} 、 θ_{22} (图2.35中均为负)和 θ_{31} 、 θ_{32} (图2.35中均为正)的解,它们分别为

$$\theta_{21} = \frac{\phi_2}{2} - \phi_1 \quad (2.181)$$

$$\theta_{22} = -\frac{\phi_2}{2} - \phi_1 \quad (2.182)$$

$$\theta_{31} = \frac{\pi}{2} - \phi_2 \quad (2.183)$$

$$\theta_{32} = \frac{\pi}{2} + \phi_2 \quad (2.184)$$

在求得 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 之后,由第3篇2.2.2节中的递推公式(2.69)可计算出 n_3 、 o_3 、 a_3 。从而由图2.36的几何学关系,计算出 θ_4 、 θ_5 。首先,将末端执行器的接近向量 a_h 投影到由 n_3 和 o_3 所构成的平面上,令其为 a_h^* 。 θ_4 是 a_h^* 和 n_3 的夹角,那么图2.36中的 θ_{40} 可以由下式求得:

$$\theta_{40} = \arg(a_h \cdot n_3, a_h \cdot o_3) \quad (2.185)$$

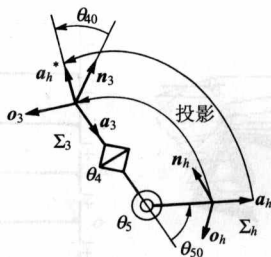


图 2.36 确定 θ_4 、 θ_5

另外, θ_5 是 a_3 和 a_h 的夹角,故图2.36中的 θ_{50} 可由下式求得:

$$\theta_{50} = \arccos(a_h \cdot a_3) \quad (2.186)$$

若把 θ_{40} 旋转 180° ,并使 θ_{50} 的符号反向,其结果是 a_h 的方向不变。由此可知, θ_4 、 θ_5 有两个解。若把 θ_{40} 、 θ_{50} 代入式(2.170)中,即可求得这两个解。

求出 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 后,由第3篇2.2.2节中的递推式(2.69)可计算出 n_5 、 o_5 ,那么由图2.37的几何关系,可以计算出 θ_6 ,即

$$\theta_6 = \arg(n_h \cdot n_5, n_h \cdot o_5) \quad (2.187)$$

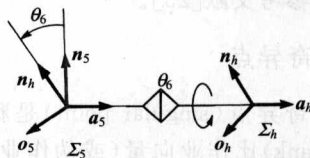


图 2.37 确定 θ_6

4. 逆坐标变换的数值解法

逆坐标变换的数值解法,已知有Newton-Raphson法^[22,23]。Newton-Raphson法作为非线性方程的数值解法是众所周知的。若采用这个方法,当 r 给出时,则满足 $r = R(q)$ 的解 q 可以用式(2.95)的雅可比矩阵 J_k 对下式迭代求得:

$q_{i+1} = q_i + k_a J_h^{-1}(q_i)[r - R(q_i)]$ (2.188)

k_a 是为了改善计算收敛性的增益,通常令 $k_a = 1$ 。但是当 J_h 为奇异(singular)阵或长方矩阵时,无法计算 J_h^{-1} 。在这种情况下,就用 J_h 的广义逆矩阵。

图 2.38 所示^[24]为利用这种方法求解逆坐标变换的例子。计算过程中的 $r_i = R(q_i)$, 在图 2.38 中以该位置和姿态的手部(hand)来表示,并画出其图形。从图 2.38 上可以很清楚地看出解的收敛过程。

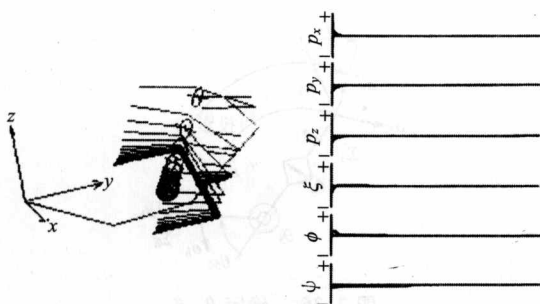


图 2.38 逆坐标变换的数值计算举例

使用这样的数值计算的问题是解的收敛性和 q_i 的初始值 q_0 的选择方法。关于解的收敛性,众所周知,它不仅与增益 k_a 的值有关,而且还和雅可比矩阵的值,即手臂的姿态有关^[25]。此外,通常逆坐标变换存在若干个解,但根据 q_0 的选择方法,可以决定所求得解的种类。

除此以外,有关逆坐标变换的数值解法,有人还提出了把运动学方程式置换为高次多项式,由根来计算 q 的算法等^[23]。详细情况可以阅读参考文献^[23]。

2.2.5 奇异点

所谓奇异点(singular point)是雅可比矩阵的秩(rank)比作业向量(或伪作业向量)的维数要小的点。设雅可比矩阵为 $J(J_h$ 或 $J_s)$, 作业向量的维数为 m ,则在奇异点处存在

$$\text{rank } J < m \quad (2.189)$$

如果选择 J_h 作为 J ,则根据式(2.118),有下式成立:

$$\text{rank } J_h \leq \min(\text{rank } N^{-1}, \text{rank } J_s) \quad (2.190)$$

因而可以认为,此时 J 的秩的减少是由于 N^{-1} 的秩的减少和 J_s 的秩的减少的缘故。

根据式(2.100)~式(2.102), N 是姿态角 ϕ_h 的函数,其值与 ϕ_h 的定义有关。从而, N^{-1} 的秩的减少是与 ϕ_h 的定义有关的,也就意味着作业向量自身维数的减少。 J_s 的秩的减少是与手臂的结构特性有关。通常,手臂的奇异点是使下式成立的点:

$$\text{rank } J_s < m \quad (2.191)$$

奇异点可以用奇异值分解法(singular value decomposition)来进行分析。考虑到广义性,令 $m \leq n$, J_s 的奇异值分解由下式给出:

$$J_s = U_s \Sigma_s V_s^T \quad (2.192)$$

其中,

$$\Sigma_s = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & \\ & \sigma_2 & & 0 & \\ & & \dots & & \\ & 0 & & \dots & \\ & & & & \sigma_m & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.193)$$

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$ 是 J_s 的奇异值(singular value), U_s, V_s 分别是 $m \times m, n \times n$ 的正交矩阵。在奇异点上,对于 $i = m, m-1, \dots, m-j$, 有 $\sigma_i = 0$ 。(j+1)表示退化(degenerate)自由度的数。若设

$$U_s = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m] \quad (2.194)$$

则可能失去的自由度的方向是 $u_m, u_{m-1}, \dots, u_{m-j}$ 。

作为奇异点,具有下面两条重要的性质^[6]:

- ①在奇异点上,作业坐标的自由度退化。
- ②奇异点是解的种类的变化点。

根据性质①,在奇异点上不可能对退化的作业坐标进行位置和力的控制。因此,手臂的作业性能显著恶化。对手臂的作业性能(task performability)的评价可以参阅文献^[26]。性质②成为理解手臂工作空间(work-space)结构的关键。详细内容可参阅文献^[23]。

下面仍以图 2.27 所示的 D-ARM 为例,对奇异点的性质做具体的讨论。若计算 D-ARM 的 J_s 的行列式(determinant)可得

$$\det J_s = a_2 d_2 (a_2 C_2 + d_4 S_{23}) C_3 S_5 \quad (2.195)$$

在 D-ARM 中,因为有 $a_2 = d_4 = l_1$,若求解 $\det J_s = 0$

$$(2.196)$$

可得奇异点 θ_i , 如下列各式所示:

$$(a) \theta_2 + \frac{\theta_3}{2} = n\pi - \frac{\pi}{4} \quad (2.197)$$

$$(b) \theta_3 = n\pi + \frac{\pi}{2} \quad (2.198)$$

$$(c) \theta_5 = n\pi \quad (2.199)$$

此结果示于图 2.39 中。图 2.39(a) 和 (b) 失去了 d_1 、 d_2 方向的平移自由度, 而图 2.39(c) 则失去了围绕 d_3 旋转的自由度。

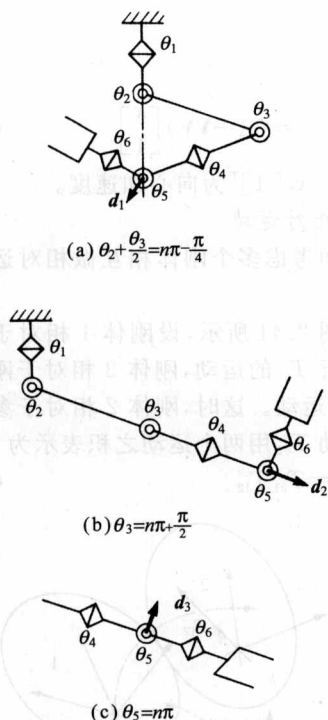


图 2.39 D-ARM 的奇异点

在奇异点上失去的自由度, 通过奇异值分解法可以很容易地将其求出, 用向量几何学方法也可以得出同样的结论。不过向量方法比较直观, 更容易理解。

例如, 对图 2.39(a) 中所失去的 d_1 方向的自由度解释如下。若把由 Σ_{j-1} 的原点至 Σ_6 的原点(手腕)的向量设为 $p_{6,j-1}$, 则由关节 j 的旋转速度 $\dot{\theta}_j$ 所产生的 d_1 方向的速度 v_{d1}^j 可由下式求出:

$$v_{d1}^j = [(a_{j-1} \times p_{6,j-1}) \cdot d_1] \dot{\theta}_j \quad (2.200)$$

在图 2.39(a) 的姿态中, $a_0 \parallel p_{6,0}$, $a_1 \parallel d_1$, $a_2 \parallel d_1$, $a_3 \parallel p_{6,3}$, $p_{6,4} = p_{6,5} = 0$, 故对于 $j=1 \sim 6$, 式(2.200)为 0, 即意味着失去了 d_1 方向的自由度。

若将由式(2.153)、式(2.158)和式(2.169)所定义的符号函数

$$k_1 = \text{sgn}(a_2 C_2 + d_4 S_{23})$$

$$k_2 = \text{sgn}(C_3)$$

$$k_3 = \text{sgn}(S_5)$$

作为式(2.195)中的因子, 则奇异点的性质(2)就容易理解了。用 $[k_1, k_2, k_3]$ 的形式, 能把图 2.32 中逆运动学的 8 类解进行系统的分类^[6], 如图 2.40 所示。

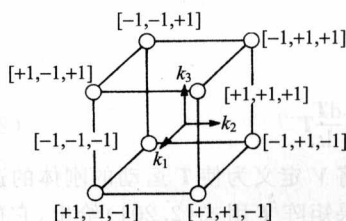


图 2.40 表示解的种类的状态图

手臂的解的种类、是否在奇异点上等拓扑信息均可由图 2.40 中的状态点 $[k_1, k_2, k_3]$ 的位置表示出来。

内山 胜

2.2.6 其他方法(基于李代数的运动分析)

1. 运动群(刚体运动)

为了表示在三维空间内运动的刚体运动, 除规定参考坐标系外, 再在刚体上固结刚体坐标系。设刚体坐标系的原点在参考坐标系中的位置为 P , 再设定将各轴方向的余弦向量作为列向量的正交矩阵为 R , 则该坐标系可以用下式的矩阵来表示:

$$T = \begin{bmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.201)$$

式中, 000 是用列向量表示的三维零向量。设刚体坐标系中刚体上的点的齐次坐标为 $[x_0^T \ 1]^T$, 若改用参考坐标系表示该点, 则为

$$\begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.202)$$

这样, 在参考坐标系中刚体上任意点的位置向量可以用矩阵 T 来表示, 即 T 能够表示刚体的位置和姿态。由于 T 是正则矩阵, 因此该矩阵的全部集合是群。

刚体在运动中, 矩阵 T 是时间 t 的函数。因此, T 可以对 t 进行微分。这样, 将能够用时间进行微分的矩阵构成的群称为运动群,

将 T 的集合称为欧几里得运动群 $SE(3)$ 。由于运动群是能够进行微分的群,因此这是李群(Lie group)。

2. 刚体的速度及加速度

运动刚体上的点相对于参考坐标系的速度通过用时间对式(2.202)进行微分而求得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} &= \frac{dT}{dt} \begin{bmatrix} x_0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{dT}{dt} T^{-1} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.203)$$

式中,设

$$V = \frac{dT}{dt} T^{-1} \quad (2.204)$$

即我们将 V 定义为使 T 运动的刚体的速度。

如果矩阵 T 用式(2.201)给出,它的速度 V 就为

$$\begin{aligned} V &= \begin{bmatrix} \frac{dR}{dt} & \frac{dp}{dt} \\ 000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^T & -R^T p \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{dR}{dt} R^T & \frac{dp}{dt} - \frac{dR}{dt} R^T p \\ 000 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.205)$$

由于 R 是正交矩阵,因此 $RR^T = E_3$ (E_3 为三阶单位矩阵),将它微分后加以整理,得到下述的关系:

$$\frac{dR}{dt} R^T = - \left(\frac{dR}{dt} R^T \right)^T \quad (2.206)$$

由此可知, $(dR/dt)R^T$ 是反对称矩阵。三阶反对称矩阵是与三维向量的外积运算等效的矩阵,设该向量为 w ,表示为 $[w \times]$ 。即刚体的速度为

$$V = \begin{bmatrix} [w \times] & \frac{dp}{dt} - w \times p \\ 000 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.207)$$

用运动刚体上的点来表示位于参考坐标系的原点的点的速度,即表示刚体上点的速度时,向量场的参考坐标系原点的向量 v_0 为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_0 \\ 0 \end{bmatrix} &= V \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} - w \times p \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.208)$$

使用该向量 v_0 ,则 V 成为

$$V = \begin{bmatrix} [w \times] & v_0 \\ 000 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.209)$$

式中, w 为表示刚体旋转的正交矩阵经过时间进行微分后求得的向量,它称为刚体的旋转速度。刚体的速度矩阵是由刚体的旋转速度 w 与刚体上的点在该瞬间位于参考坐标系原点的点的速度所组成的矩阵。

将矩阵的加速度 A 定义为

$$A = \frac{dV}{dt} \quad (2.210)$$

这时,刚体上的点 $[x_0^T \ 1]^T$ 的加速度为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d^2 x}{dt^2} \\ 0 \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} + V \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= (A + VV) \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.211)$$

式中, $VV[x_0^T \ 1]^T$ 为向心加速度。

1) 相对运动

下面考虑多个刚体相互做相对运动时的情况。

如图 2.41 所示,设刚体 1 相对于参考坐标系进行 T_{01} 的运动,刚体 2 相对于刚体 1 进行 T_{12} 的运动。这时,刚体 2 相对于参考坐标系的运动 T_{02} 用两个运动之积表示为

$$T_{02} = T_{01} T_{12} \quad (2.212)$$

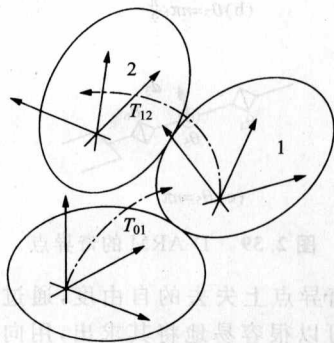


图 2.41 刚体的相对运动

因而,刚体 2 相对于参考坐标系的速度 V_{02} 为

$$\begin{aligned} V_{02} &= \frac{d(T_{01} T_{12})}{dt} (T_{01} T_{12})^{-1} \\ &= \frac{dT_{01}}{dt} T_{01}^{-1} + T_{01} \frac{dT_{12}}{dt} T_{12}^{-1} T_{01}^{-1} \end{aligned} \quad (2.213)$$

如果运动 T_{01} 不是时间的函数,即表示刚体 1 相对于参考坐标系无运动时的速度矩阵,那么式(2.213)右边第二项表示在参考坐标系中刚体 2 相对于刚体 1 的速度。将它称

为刚体2相对于刚体1的相对速度。

在式(2.213)中,第一项 $(dT_{01}/dt)T_{01}^{-1}$ 为运动 T_{01} 相对于参考坐标系的速度矩阵,这是运动 T_{01} 相对于参考坐标系的相对速度矩阵 V_{01} 。若用 V_{12} 表示刚体2相对于刚体1的相对速度,则用运动之积 $T_{01}T_{12}$ 表示的刚体运动的速度矩阵 V_{02} 为相对运动之和,即

$$V_{02} = V_{01} + V_{12} \quad (2.214)$$

若运动之积为 $T_{01}T_{12}\cdots T_{(n-1)n}$,也可以表示为

$$T_{0n} = T_{0(n-1)}T_{(n-1)n} \quad (2.215)$$

因此,与式(2.215)相同有

$$V_{0n} = V_{0(n-1)} + V_{(n-1)n} \quad (2.216)$$

若同样求得 $V_{0(n-1)}, V_{0(n-2)}, \dots$,则结果得到

$$V_{0n} = V_{01} + V_{12} + \cdots + V_{(n-1)n} \quad (2.217)$$

下面讨论运动 $T_{01}T_{12}$ 的加速度。设相对速度矩阵中的 T_{01} 不是时间的函数,那么刚体之间的相对加速度矩阵 V_{12} 的时间微分可以表示为

$$\begin{aligned} A_{12} &= \left. \frac{dV_{12}}{dt} \right|_{T_{01}=\text{const.}} \\ &= \left. \frac{d}{dt} (T_{01}V_2T_{01}^{-1}) \right|_{T_{01}=\text{const.}} \\ &= T_{01} \frac{dV_2}{dt} T_{01}^{-1} \end{aligned} \quad (2.218)$$

式中, V_2 为

$$V_2 = \frac{dT_{12}}{dt} T_{12}^{-1} \quad (2.219)$$

同样, A_{01} 为

$$A_{01} = \frac{dV_{01}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dT_{01}}{dt} T_{01}^{-1} \right) \quad (2.220)$$

另外,根据式(2.210)的定义,将式(2.214)进行微分得到

$$A_{02} = \frac{dV_{01}}{dt} + \frac{dV_{12}}{dt} \quad (2.221)$$

从式(2.219)中可以得到下式的关系:

$$T_{01}V_2 = V_{12}T_{01} \quad (2.222)$$

将上式微分得到

$$\frac{dT_{01}}{dt}V_2 + T_{01}\frac{dV_2}{dt} = \frac{dV_{12}}{dt}T_{01} + V_{12}\frac{dT_{01}}{dt} \quad (2.223)$$

根据式(2.223), V_{12} 的时间微分为

$$\begin{aligned} \frac{dV_{12}}{dt} &= \left[\frac{dT_{01}}{dt}V_2 + T_{01}\frac{dV_2}{dt} - V_{12}\frac{dT_{01}}{dt} \right] T_{01}^{-1} \\ &= V_{01}T_{01}V_2T_{01}^{-1} + T_{01}\frac{dV_2}{dt}T_{01}^{-1} \end{aligned}$$

$$-V_{12}V_{01}$$

$$= V_{01}V_{12} + A_{12} - V_{12}V_{01} \quad (2.224)$$

由于 dV_{01}/dt 与 A_{01} 相等,故若用式(2.224)中的关系,则式(2.221)即变为

$$A_{02} = A_{01} + A_{12} + [V_{01}V_{12}] \quad (2.225)$$

式中, $[V_{01}V_{02}]$ 的表示方法被称为 V_{01} 与 V_{12} 的换位子积(李括号, Lie Bracket),它具有下述交换律运算的性质:

$$[AB] = AB - BA \quad (2.226)$$

根据式(2.221)与(2.225)的关系可知

$$\frac{dV_{12}}{dt} = \left. \frac{dV_{12}}{dt} \right|_{T_{01}=\text{const.}} + [V_{01}V_{12}] \quad (2.227)$$

这是表示速度 V_{01} 上的速度矩阵 V_{12} 的微分,是设 $V_{01}=0$ 时的 V_{12} 的微分加上因 V_{01} 的运动而引起的 V_{12} 的变化分量,即换位子积 $[V_{01}V_{02}]$ 。用换位子积给出的加速度是哥氏加速度的广义形式。

这样,刚体运动就以相对速度的线性耦合给出。刚体速度的集成为线性空间。将该线性空间称为欧几里德运动群 $SE(3)$ 的李代数 $se(3)$ 。

2) 空间运动的向量表示

绕参考坐标系原点的旋转运动的速度矩阵 V_R 为

$$V_R = \begin{bmatrix} [w \times] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.228)$$

通过原点的方向 w 的直线上的点的速度相对于具有任意实数值的 λ 为

$$V_R \begin{bmatrix} \lambda w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.229)$$

其值是零。将旋转运动中这种速度为零的点所集合成的直线称为旋转轴。旋转速度的集合形成三维线性空间,故它可以用向量 w 来表示。

如式(2.207)所示,刚体的速度矩阵可以用两个向量 w 及 V_0 表示。因此,该速度矩阵的全部集合(即李代数)称为六维线性空间,若将其基向量表示为 V ,则可以设

$$V = \begin{bmatrix} w \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.230)$$

若将两个空间运动的速度矩阵的换位子积定义为向量所表示的外积,则空间运动速度向量的外积公式为

$$\begin{bmatrix} a \\ a_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b \\ b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \times b \\ a \times b_0 + a_0 \times b \end{bmatrix} \quad (2.231)$$

加速度矩阵也同样可以用六维向量来表示。

3) 运动的轴

在图 2.42 中,通过点 r_0 ,并位于方向 a 的直线上的点 r 满足下述方程式:

$$r \times a = r_0 \times a \quad (2.232)$$

若设

$$a_0 = r_0 \times a \quad (2.233)$$

则坐标 $[a \ a_0]$ 与上述直线对应。所以,将该坐标称为直线坐标。这是齐次坐标,即使是乘以实数倍,也表示同一条直线,它显然满足下式:

$$a \cdot a_0 = 0 \quad (2.234)$$

假设刚体的运动是绕固定轴的旋转运动。设速度向量由 $\dot{\theta} [d^T \ m_0^T]^T$ 给出,而且 $[d^T \ m_0^T]^T$ 不是 θ 的函数,而是一个定值,现今下式成立:

$$d \cdot m_0 = 0 \quad (2.235)$$

于是, $[d^T \ m_0^T]^T$ 成为直线的齐次坐标。设 d 是单位向量,在刚体绕该直线以 $\dot{\theta}$ 的速度旋转时,刚体上位于参考坐标系原点的点的速度为 $\dot{\theta} m_0$,即 $\dot{\theta} [d^T \ m_0^T]^T$ 是绕 $[d^T \ m_0^T]^T$ 直线的旋转运动。该直线是旋转运动的轴。

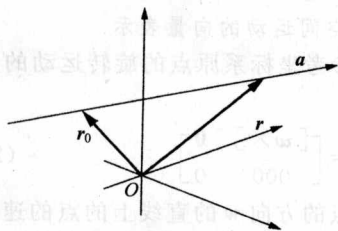


图 2.42 直线坐标

但是,如果给出任意两个向量(6个参数) $[s^T \ s_0^T]^T$,它们一般不是直线。若 s 不是零向量,那么可写为

$$\begin{bmatrix} s \\ s_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ s_0 - \frac{s \cdot s_0}{s \cdot s} s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{s \cdot s_0}{s \cdot s} s \end{bmatrix} \quad (2.236)$$

式(2.236)右边的两个坐标都是直线坐标。第1个坐标是从原点起的垂直距离为有限值的直线,而第2个坐标是位于无穷远处的轴上的直线。因此,若给出任意的6个参数,它可以用两条直线之和来表示。不过可以将 s 视为单纯向量时的 $\dot{\theta} [s^T \ s_0^T]^T$ 。将 $[s^T \ s_0^T]^T$ 分解,第1个坐标项是绕轴的旋转,第2个坐标项给出沿旋转轴的平移运动。因而,这是一个螺旋运动。第1个坐标给出该螺旋运动的轴的位置。可见, $[s^T \ s_0^T]^T$ 一般表示螺旋运

动,因此将它称为螺旋坐标。螺旋坐标的节距是

$$h = \frac{s \cdot s_0}{s \cdot s} \quad (2.237)$$

在螺旋坐标中,如果 s 与 s_0 成直角,则属于直线坐标。因此,直线坐标是节距为0的螺旋坐标。 $[0^T \ m_0^T]^T$ 则可以视为节距无穷大的螺旋坐标。

4) 力的表示法

在欧几里得空间中,力是用直线上的具有方向及长度的线段来表示的。因此,若用 f 表示方向及长度,则力用通过 r_0 的直线的齐次坐标 $[f^T (r_0 \times f)^T]^T$ 来表示。 $r_0 \times f$ 是力产生的在参考坐标系原点的力矩。这样,力就与刚体的旋转速度一样,能够与直线相对应了。以 $[f^T \ m_0^T]^T$ 的形式表示的力称为力的螺旋坐标表示法。

两条直线的齐次坐标之和一般不是直线。如同旋转速度的表示一样,它是用一个沿轴的力与绕该轴的力偶之和的形式表示的。一般称其为 wrench,但在这里将它也包含在内,简称为力。

利用刚体的速度与作用于刚体的力可以决定刚体的功率,它属于标量值。这时,力可以看成是速度向量与一个标量值对应的线性函数。将这样的线性函数的集合称为速度向量的线性空间的对偶空间。可以规定对偶空间的对偶基底。假设速度空间的基底为 $\{e_1, e_2, \dots, e_6\}$,它的对偶基底为 $\{e^1, e^2, \dots, e^6\}$,这时若用 $e_i^T e^j$ 表示两个基底向量的功率,则其满足下式的关系:

$$e_i^T e^j = \delta_{ij} \quad (\text{式中, } \delta_{ij} \text{ 是克罗内克符号}) \quad (2.238)$$

若规定了速度的线性空间的基底,那么其对偶基底也就自动规定了,它应该满足式(2.238)的关系。

用平行于参考坐标系轴的单位向量为基构成基底的数向量后,速度即可表示为

$$V = \begin{bmatrix} w \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (2.239)$$

于是,力的对偶基底数向量为

$$F = \begin{bmatrix} m_0 \\ f \end{bmatrix} \quad (2.240)$$

这时,两者形成的功率用 $V^T F$ 给出。

将速度空间的基底变换为 $\{M_1, M_2, \dots,$

$M_6\}$,再以该基底的数向量的形式将速度 V 改写成 $\dot{\theta}$, 则得到

$$V = J \dot{\theta} \quad (2.241)$$

$$J = [M_1 \ M_2 \ \cdots \ M_6] \quad (2.242)$$

若将其改写成速度空间的基底,则其对偶基底也会发生变化。设相对于新对偶基底中力的数向量为 μ ,用下式表示成:

$$\mu = GF \quad (2.243)$$

则对于任意的 F 及 V ,下式必须成立:

$$V^T F = \dot{\theta}^T \mu \quad (2.244)$$

故必须满足关系

$$G = J^T \quad (2.245)$$

3. 机构分析

1) 串联机构的运动分析

当两个杆件用单自由度运动进行副连接时,表示运动副单位运动的向量 M 由下式给出:

$$\text{旋转副 } M = \begin{bmatrix} d \\ r_0 \times d \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{移动副 } M = \begin{bmatrix} 0 \\ d \end{bmatrix}$$

$$\text{螺旋副 } M = \begin{bmatrix} d \\ r_0 \times d + hd \end{bmatrix}$$

式中, d 为运动副的轴向单位向量; r_0 为运动副轴上的点的位置向量; h 为螺旋的节距。另外,运动副的速度 $\dot{\theta}$ 在旋转副及螺旋副时表示绕轴的角速度,在移动运动副时表示沿轴的平移速度。

下面研究用这样的单自由度运动副连接的 6 个自由度串联机构的分析。如图 2.43 所示,设相对于静止杆件,利用运动副 1, 2, ..., 6 将杆件 1, 2, ..., 6 串联连接起来。设运动副 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 的轴为 M_i , 运动副的运动参数为 θ_i 。这时,根据式(2.217)的关系,杆件 i 的速度 V_i 用下述的递推公式给出:

$$V_i = V_{i-1} + \dot{\theta}_i M_i \quad (2.246)$$

另外,若用外积表示换位子积,则杆件 i 的加速度 A_i 的递推公式为

$$A_i = A_{i-1} + \ddot{\theta}_i M_i + V_{i-1} \times (\dot{\theta}_i M_i) \quad (2.247)$$

将这些递推公式从静止杆件一侧起依次将其用于杆件,从而求出全部杆件的速度,特别是末端杆件的速度 V_h 用下列的形式给出:

$$V_h = \dot{\theta}_1 M_1 + \dot{\theta}_2 M_2 + \cdots + \dot{\theta}_6 M_6$$

$$= [M_1 \ M_2 \ \cdots \ M_6] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix}$$

$$= J \dot{\theta} \quad (2.248)$$

将该 M_i ($i=1, 2, \dots, 6$) 作为列向量形成矩阵 J , 称之为串联机构的雅可比矩阵。

把速度空间的基底向量设为表示运动副轴的 M_i ($i=1, 2, \dots, 6$), 则 $\dot{\theta}$ 就是用该基底的数向量所表示的 V_h 。

加速度的分析也可根据式(2.247)同样进行。

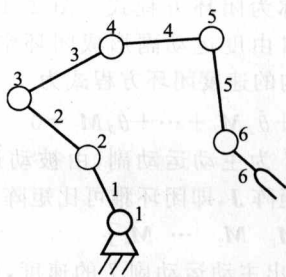


图 2.43 串联机构

2) 串联机构的力分析

考虑 6 个自由度串联机构的力的平衡情况。沿着从静止杆件一侧开始向上部杆件作用的方向,设通过运动副在杆件之间的作用的运动副力为 H 。这时,沿反方向作用了一 H 。若对杆件及运动副标记与前面相同的编号,则杆件上的力平衡式为

$$H_i + F_i - H_{i+1} = 0 \quad (i < 6) \quad (2.249)$$

$$H_6 + F_6 = 0 \quad (2.250)$$

将它进行整理,则成为

$$H_i = - \sum_{j=i}^6 F_j \quad (\text{其中}, i=1, 2, \dots, 6) \quad (2.251)$$

由于与 H_i 反方向的力是一定的,于是可知,作用于杆件上的力在运动副中产生的力矩可以用 $-M_i^T H_i$ 给出(图 2.44)。

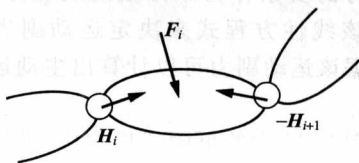


图 2.44 作用于杆件上的力

设作用于杆件上的力在运动副中产生的力矩所组成的向量为 μ , 则用下式求出的 F_h 为

$$F_h = (J^T)^{-1} \mu \quad (2.252)$$

它被定义为与运动副力矩等价的末端杆件上的作用力。它是将作用于全部杆件的力置换为作用于杆件末端的一个力。

3) 闭式机构的分析

在闭式机构的分析中, 可以将它看成是开式机构的末端杆件通过一个运动副与静止杆件连接而成的。因此, 速度及加速度的分析是从静止杆件开始, 沿着运动副又回到静止杆件的, 从而使其又变成原来的值, 即零。将该关系称为闭环方程式。图 2.45 所示为用 7 个单自由度运动副形成闭环空间机构, 该空间机构的速度闭环方程式为

$$\dot{\theta}_1 M_1 + \dot{\theta}_2 M_2 + \cdots + \dot{\theta}_7 M_7 = 0 \quad (2.253)$$

设运动副 7 为主动运动副, 由被动运动副的轴构成的矩阵 J , 即闭环雅可比矩阵为

$$J = [M_1 \ M_2 \ \cdots \ M_6] \quad (2.254)$$

这时, 若给出主动运动副 7 的速度, 则被动运动副的速度向量 $\dot{\theta}_p$ 为

$$\dot{\theta}_p = -J^{-1} \dot{\theta}_7 M_7 \quad (2.255)$$

至于对加速度的分析, 除了加上哥氏加速度一项常数项外, 其他的基本相同。

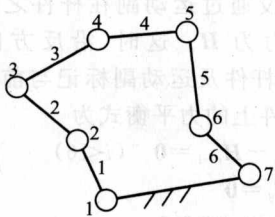


图 2.45 闭式机构

在闭式机构的力分析中用到被动运动副的功率是零的条件。将闭式机构内的一个运动副的运动副力作为未知数, 建立杆件的力平衡方程式, 根据被动运动副的条件, 导出将运动副力的要素作为未知数的线性方程式, 再求解该线性方程式来决定运动副力的大小。根据该运动副力可以计算出主动运动副的转矩。

在图 2.46 中的单闭式机构中, 设通过运动副 7 从静止杆件作用有力 H_7 , 在该运动副部位将闭式机构切断。设此时由于作用于杆

件 $i (i=1, 2, \dots, 6)$ 的力 F_i 在被动运动副产生的转矩向量为 μ_p 。与该转矩等效的作用于杆件 6 的力 F_p 由下式给出:

$$F_p = (J^T)^{-1} \mu \quad (2.256)$$

因此, 作用于被动运动副的转矩为 F_p 及 H_7 产生的转矩之和, 而由于 6 个被动运动副的转矩必须是零, 故下式必须成立:

$$H_7 + F_p = 0 \quad (2.257)$$

由式 (2.257) 可知, 作用于主动运动副的力 H_7 等于 $-F_p$, 因此转矩 τ 由下式求出:

$$\begin{aligned} \tau &= -M_7^T F_p \\ &= -(J^{-1} M_7)^T \mu \end{aligned} \quad (2.258)$$

于是可知, 由切断闭环的机构进行转矩分析的结果而得到的被动运动副转矩向量, 以及用被动运动副作为基底向量的基底的数向量所表示的主动运动副 (即运动副 7) 之间的功率能够计算出闭式机构主动运动副的转矩。

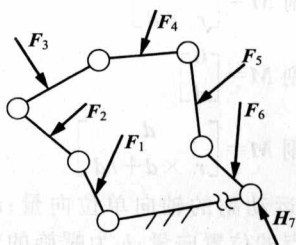


图 2.46 作用于闭式机构的力

杉本浩一

2.3 手臂力学

2.3.1 手臂静力学

1. 关节驱动力与末端作用力的关系

如图 2.47 所示, 在静止状态下, 有力 f_h 及力矩 n_h 作用在 n 个自由度的机器人手臂末端坐标系 Σ_h 的原点 O_h 处, 下面讨论与它平衡的各个关节力-转矩 $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T \in R^n$ 的求解问题。式中, τ 称为关节驱动力或转矩, 它的第 i 个元素在当关节 i 是移动关节时意味着是力, 当关节 i 是旋转关节时意味着是转矩。

考虑关节微小虚位移 $\delta q \in R^n$, 它与因该虚位移而产生的在参考坐标系内所表示的末端虚位移 $\delta r \in R^m$ 之间的关系如下:

$$\delta r = J(q) \delta q \quad (2.259)$$

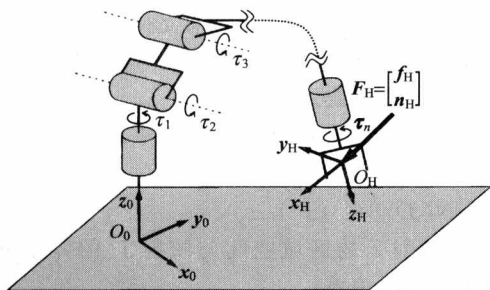


图 2.47 末端作用力与关节驱动力

式中, $m \leq n$, $J(q) = \partial r / \partial q \in R^{m \times n}$ 是由机器人手臂运动学推导出的雅可比矩阵。为了将作用于机器人手臂的平移力及力矩用一个对偶来表示, 定义为

$$F_H = \begin{bmatrix} f_H \\ n_H \end{bmatrix} \in R^m \quad (2.260)$$

式中, F_H 为力向量或力螺旋(wrench)。因为力螺旋而产生的微小的虚位移 δr , 故机器人手臂所做的功可以表示为 $-\delta r^T F_H$ 。另外, 若因关节驱动力 τ 而产生微小的虚位移 δq , 则它的功表示为 $\delta q^T \tau$ 。根据虚功原理, 按照几何学的约束可知, 对任意的虚位移的虚功总和 δW_{work} 应该为零, 因此下式成立:

$$\delta W_{\text{work}} = \delta q^T \tau - \delta r^T F_H = 0 \quad (2.261)$$

将式(2.259)的关系代入式(2.261)中, 则得到

$$\delta q^T \tau = \delta q^T J^T F_H$$

显然, 该关系对于任意的微小位移 δq 均成立, 故可以导出下列关系:

$$\tau = J^T F_H \quad (2.262)$$

式(2.262)表示雅可比矩阵的转置矩阵与关节驱动力及作用于末端坐标系的力螺旋的关系。

2. 作用于末端坐标系原点的力螺旋与作用于基座坐标系原点的等效力螺旋

图 2.48 所示, 力螺旋 $F_H = (f_H^T, n_H^T)^T$ 作用于末端坐标系 Σ_H 的原点 O_H , 试求与它平衡的作用于参考坐标系 Σ_0 的原点 O_0 的力螺旋 $F_0 = (f_0^T, n_0^T)^T$ 。

根据力平衡关系有

$$f_0 = f_H \quad (2.263)$$

根据力矩平衡关系有

$$n_0 = n_H + p_H \times f_H \quad (2.264)$$

式中, $p_H \in R^3$ 是从参考坐标系表示的参考坐标原点指向手部坐标原点的位置向量。根据

这些关系可得

$$F_0 = \begin{bmatrix} E_3 & 0 \\ S(p_H) & E_3 \end{bmatrix} F_H \quad (2.265)$$

式中, $E_3 \in R^{3 \times 3}$ 为单位矩阵, 符号 $S(a)$ 为向量 $a = (a_x, a_y, a_z)^T$ 的外积所表示的变形对称矩阵, 定义为

$$S(a) \equiv \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.266)$$

式(2.266)可以将任意向量 $b \in R^3$ 表示为 $a \times b = S(a)b$ 。很明显, 存在 $S^T(a) = -S(a)$ 的关系。式(2.265)表示在不同作用点平衡的等效力与力矩的关系。

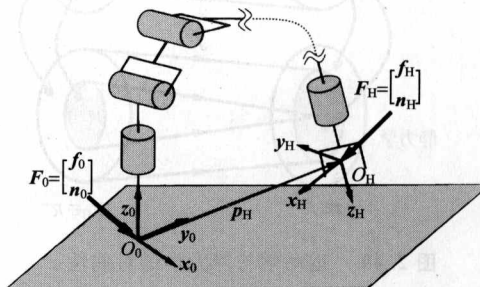


图 2.48 等效力螺旋向量

接下来, 我们来求解与用手部坐标系表示的力螺旋等效的用参考坐标表示的力螺旋。将手部坐标系表示的力螺旋记为 ${}^H F_H = ({}^H f_H^T, {}^H n_H^T)^T$ 。在本节中, 左上角标表示描述向量的坐标系, 未进行特别标注时约定这是手臂参考坐标系。如果将从参考坐标系来看的作用于手部坐标原点的力及力矩改成用手部坐标系表示的力及力矩, 则 $f_H = {}^0 R_H {}^H f_H$, $n_H = {}^0 R_H {}^H n_H$ 。式中, ${}^0 R_H$ 是从参考坐标系向手部坐标系的旋转矩阵。将它们代入式(2.265)中则有

$$F_0 = \psi_H {}^H F_H \quad (2.267)$$

其中,

$$\psi_H = \begin{bmatrix} {}^0 R_H & 0 \\ S(p_H) {}^0 R_H & {}^0 R_H \end{bmatrix} \quad (2.268)$$

式(2.267)表示不同坐标系所描述的等效力螺旋的关系式, 若将其置换为其他的坐标系, 这种关系也同样成立。

2.3.2 运动学与静力学的对偶性

通过分析雅可比矩阵, 式(2.262)表示的

静力学与下式的速度的运动学关系式

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.269)$$

之间存在着密切的关系,这个性质被称为运动学与静力学的对偶性(duality between the velocity kinematics and statics),即在机器人手臂的某个特定位置及姿态下,运动学与静力学之间具有如图 2.49 所示的线性映射关系^[1]。

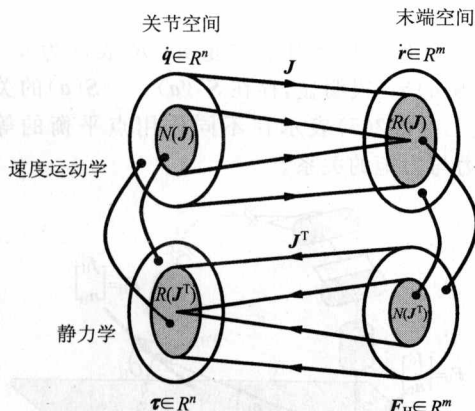


图 2.49 运动学与静力学的对偶性

根据速度运动学关系,雅可比矩阵可以看作是机器人手臂在特定位置及姿态下从 n 维向量空间 R^n 向 m 维向量空间 R^m 的线性映射。映射的区域空间 $R(J)$ 表示由关节速度向量 $\dot{\mathbf{q}} \in R^n$ 生成的全部可能的末端速度向量 $\dot{\mathbf{r}} \in R^m$ 的值域,相对于任意关节速度向量 $\dot{\mathbf{q}}$,必定唯一决定末端速度 $\dot{\mathbf{r}}$ 。映射 J 的零空间 $N(J)$ 表示不产生末端速度的关节速度的全部的值域。在雅可比矩阵为非全秩的奇异姿态下,区域空间 $R(J)$ 不充满 m 维空间。这就意味着至少存在一个机器人手臂的末端不运动的方向。另外,若零空间 $N(J)$ 不是空的,则存在着无限多个产生相同末端速度的关节角度组。

根据静力学的关系,雅可比矩阵的转置矩阵 J^T 可以看作是从 m 维向量空间 R^m 向 n 维向量空间 R^n 的线性映射。映射 J^T 的区域空间 $R(J^T)$ 表示由末端力螺旋 $\mathbf{F} \in R^m$ 生成的全部可能的关节力矩向量 $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ 的值域,相对于任意力螺旋,必定唯一决定关节转矩向量。映射 J^T 的零空间 $N(J^T)$ 是在没有关节转矩作用的状态下达到平衡的末端作用力及力矩的值域。该零空间内的末端作用力及力矩靠来

自机器人手臂机构的反力来支持。若零空间 $N(J^T)$ 非空,则存在无限多个产生相同关节转矩向量的力螺旋。

根据线性代数的理论,映射 J 的零空间与映射 J^T 的区域空间存在下列的关系:

$$N(J) \equiv R^\perp(J^T) \quad (2.270)$$

同样,映射 J 的区域空间与映射 J^T 的零空间存在下列的关系:

$$R(J) \equiv R^\perp(N(J^T)) \quad (2.271)$$

式中, $R^\perp(*)$ 表示 $R(*)$ 的正交补空间。根据前一个式(2.270)的关系,属于零空间 $N(J)$ 的非零 n 维向量不属于区域空间 $R(J^T)$,这表明沿着与不产生末端速度的关节速度方向作用的关节转矩都不与任何末端力螺旋平衡。根据后一个式(2.271)的关系,属于零空间 $N(J^T)$ 的非零 n 维向量不属于区域空间 $R(J)$,这表明即使关节转矩不发生作用,无论利用什么关节速度,与平衡的末端力螺旋同一方向的末端速度都不可能发生。

在冗余机器人手臂中, $n > m$, 区域空间 $R(J^T)$ 未充满全部空间 R^n 。因此,必定存在不产生末端作用力及力矩的关节转矩向量的值域。

2.3.3 手臂动力学

在机器人手臂的动力学(dynamics)中,有通常的正动力学问题(正动力学模型)及逆动力学问题(逆动力学模型)。正动力学问题是给出了机器人手臂的关节驱动力、关节位移的初始条件,求解各个关节的位移、速度及加速度。逆动力学问题是给出了各个关节的位移、速度及加速度,求解关节驱动力。前者属于手臂运动方程式的积分问题,主要为计算机仿真所需要;后者应用的场合则是末端沿规划轨迹高速、高精度的运动设计,或者是动态力控制的控制输入设计。可见,机器人手臂动力学在分析及控制中将起到重要的作用。关于动力学模型(运动方程式)的求导方法,代表性的有拉格朗日法及牛顿-欧拉法^[2]。

1. 拉格朗日法运动方程式

拉格朗日法(Lagrange formulation)是根据全部杆件的动能和势能求出拉格朗日函数,再代入拉格朗日方程式中,导出机械运动方程式。该方法的主要特征是可以不考虑杆

件相互的内部约束力,但其缺点是计算十分繁琐。最初用拉格朗日法列出机器人运动方程式的学者是 Uicker 和 Kahn^[3],然后由 Hollerbach 等^[4]提出高效率的递推公式,以便实现从杆件运动来求解关节转矩的逆动力学计算。本书讲述如图 2.50 所示的 n 个自由度机器人手臂的运动方程式的基本推导方法。在图 2.50 中,杆件从基座 0 开始,依次向末端附加编号,关节 i 处于杆件 $i-1$ 与杆件 i 的连接部位。在杆件 i 上设置 i 坐标系 $\Sigma_i = \{x_i, y_i, z_i\}$,使 z_i 轴与关节轴一致, q_i 表示关节 i 的关节位移。

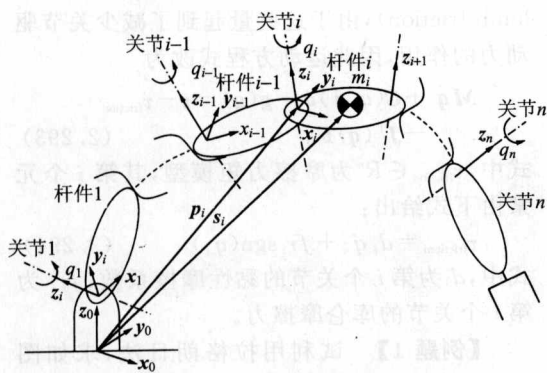


图 2.50 n 个自由度的机器人手臂

设整个手臂的动能为 K ,整个手臂的势能为 P ,则拉格朗日函数 L 用下式给出:

$$L = K - P \quad (2.272)$$

设广义坐标为关节位移 q_i ,与之对应的广义力为 τ_i ,则拉格朗日方程式为

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2.273)$$

由于势能与 \dot{q}_i 无关,因此式 (2.273) 表示为

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2.274)$$

设构成手臂的杆件 i 的动能为 K_i ,则有

$$K_i = \frac{1}{2} m_i \hat{v}_i^T \hat{v}_i + \frac{1}{2} \omega_i^T \hat{I}_i \omega_i \quad (2.275)$$

式中, m_i 为杆件 i 的质量; $\hat{I}_i \in R^{3 \times 3}$ 为用参考坐标表示的杆件质心的惯性张量; $\hat{v}_i \in R^3$ 为杆件 i 的质心的平移速度向量; $\omega_i \in R^3$ 为杆件 i 的角速度向量。上式右边第一项是由质量 m_i 的平移运动而产生的动能,第二项是绕质心

旋转而产生的动能。整个手臂的动能为

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \quad (2.276)$$

平移速度 \hat{v}_i 及角速度 ω_i 不是独立的。试用独立的广义坐标来表示它们。若将杆件看作末端,则可以采用通过雅可比矩阵来求出关节速度及末端速度的方法,即为

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}_i &= J_{P_i}^{(i)} \dot{q}_1 + \dots + J_{P_i}^{(i)} \dot{q}_i = J_P^{(i)} \dot{q} \\ \omega_i &= J_{O_i}^{(i)} \dot{q}_1 + \dots + J_{O_i}^{(i)} \dot{q}_i = J_O^{(i)} \dot{q} \end{aligned} \right\} \quad (2.277)$$

式中, $q = (q_1, \dots, q_n)^T$, $J_{P_j}^{(i)}$ 及 $J_{O_j}^{(i)} \in R^3$ 分别为雅可比矩阵 $J_P^{(i)}$ 及 $J_O^{(i)} \in R^{3 \times n}$ 的第 j 列向量,由于杆件 i 的运动仅与关节 $1 \sim i$ 有关,因此 $j > i$ 的列向量为零向量。因而其表示为

$$\left. \begin{aligned} J_P^{(i)} &= [J_{P_1}^{(i)} \dots J_{P_i}^{(i)} 0 \dots 0] \\ J_O^{(i)} &= [J_{O_1}^{(i)} \dots J_{O_i}^{(i)} 0 \dots 0] \end{aligned} \right\} \quad (2.278)$$

另外,各列向量根据关节 j 是移动关节还是旋转关节,分别表示为

$$J_{P_j}^{(i)} = \begin{cases} z_j & (\text{移动关节时}) \\ z_j \times (s_i - p_j) & (\text{旋转关节时}) \end{cases} \quad (2.279a)$$

$$J_{O_j}^{(i)} = \begin{cases} 0 & (\text{移动关节时}) \\ z_j & (\text{旋转关节时}) \end{cases} \quad (2.279b)$$

式中, z_i 为沿关节 i 的轴的单位向量; s_i 为用参考坐标表示的从参考坐标原点至杆件 i 的质心的位置向量; p_i 为用参考坐标表示的从参考坐标原点至坐标系 i 的原点的位置向量。根据这些关系可以得到

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad (2.280)$$

式中, $M \in R^{n \times n}$ 被称为机械手的惯性矩阵,由下式给出:

$$M = \sum_{i=1}^n (m_i J_P^{(i)T} J_P^{(i)} + J_O^{(i)T} \hat{I}_i J_O^{(i)}) \quad (2.281)$$

机械手的惯性矩阵 M 是对称正值矩阵,与末端的位置及姿态一起发生变化。设 M_{ij} 为 M 的 (i, j) 元素,则动能表示为

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (2.282)$$

全部杆件的势能用下式表示:

$$P = \sum_{i=1}^n m_i \tilde{g}^T s_i \quad (2.283)$$

式中, $\tilde{g} \in R^3$ 为重力加速度向量。由于 s_i 与关节角度有关,因此势能是 q_i ($i=1, \dots, n$) 的

函数。

试将这些关系式代入拉格朗日方程式。首先,由于 M_{ij} 是关节位移的函数,因此下式成立:

$$\frac{dM_{ij}}{dt} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_k$$

根据该关系式,式(2.274)的右边第一项用下式求出:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) &= \frac{d}{dt} \left(\sum_{j=1}^n M_{ij} \dot{q}_j \right) \\ &= \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial M_{ij}}{\partial t} \dot{q}_j \\ &= \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_k \dot{q}_j \end{aligned} \quad (2.284)$$

若将式(2.282)右边的下标 i 及 j 置换为 j 及 k 代入,则式(2.274)的右边第二项为

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (2.285)$$

将式(2.274)的右边第三项代入式(2.283)中,则有

$$\frac{\partial P}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^n m_j \bar{g}^T \frac{\partial s_j}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^n m_j \bar{g}^T J_{P_i}^{(j)} \quad (2.286)$$

将这些关系式代入式(2.274)中后整理得到

$$\begin{aligned} \tau_i &= \sum_{j=1}^n M_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k \\ &\quad + \sum_{j=1}^n m_j \bar{g}^T J_{P_i}^{(j)} \quad (i=1, \dots, n) \end{aligned} \quad (2.287)$$

其中,

$$h_{ijk} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \quad (2.288)$$

式(2.287)的右边第一项表示惯性项, $M_{ij} \ddot{q}_i$ 表示关节 i 的加速度产生的惯性项, $M_{ij} \ddot{q}_j$ ($i \neq j$) 表示关节 j 的加速度产生的对关节 i 的耦合项。第二项为速度平方项, $h_{ijk} \dot{q}_j^2$ 为关节 j 的速度产生的作用于关节 i 的离心力(centrifugal force), $h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ 为关节 j 及关节 k 的速度产生的作用于关节 i 的哥氏力(Coriolis force)。另外, $h_{iii} = 0$ 。第三项为表示重力影响的项。式(2.287)采用矩阵及向量可表示为

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.289)$$

式中, $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 的元素 C_{ij} 为满足下列关系的适当的矩阵:

$$\sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{q}_j = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (2.290)$$

因此, C_{ij} 的表示方法不是唯一的。另外, $g(q) \in R^n$ 的元素 g_i 为

$$g_i = \sum_{j=1}^n m_j \bar{g}^T J_{P_i}^{(j)} \quad (2.291)$$

如果在机器人手臂的末端作用了外力,即力及力矩 F_H , 由于与之平衡的关节转矩为 $J^T(q) F_H$, 故与广义位移 q 相对应的广义力为 $\tau - J^T(q) F_H$, 运动方程式可记为

$$M \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q) F_H \quad (2.292)$$

再有,若关节上作用有与关节速度成正比的黏性摩擦(viscous friction)和仅与关节速度的符号有关的一定大小的库仑摩擦(Coulomb friction), 由于这些量起到了减少关节驱动力的作用, 因此运动方程式改为

$$M \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau - \tau_{\text{friction}} - J^T(q) F_H \quad (2.293)$$

式中, $\tau_{\text{friction}} \in R^n$ 为摩擦力矩模型, 其第 i 个元素由下式给出:

$$\tau_{\text{friction}i} = d_i \dot{q}_i + f r_i \text{sgn}(\dot{q}_i) \quad (2.294)$$

式中, d_i 为第 i 个关节的黏性摩擦系数; $f r_i$ 为第 i 个关节的库仑摩擦力。

【例题 1】 试利用拉格朗日法, 求如图 2.51 所示的平面两关节机器人手臂的运动方程式。

解 杆件 1 及杆件 2 的质心位置向量为

$$s_1 = \begin{pmatrix} L_{g1} c\theta_1 \\ L_{g1} s\theta_1 \end{pmatrix}, \quad s_2 = \begin{pmatrix} L_1 c\theta_1 + L_{g2} c\theta_{12} \\ L_1 s\theta_1 + L_{g2} s\theta_{12} \end{pmatrix}$$

式中, $c\theta$ 及 $s\theta$ 分别为 $\cos\theta$ 及 $\sin\theta$ 的简略符号, θ_{12} 为 $\theta_1 + \theta_2$ 的简略符号。若将它们进行时间微分, 则杆件 1 及杆件 2 的速度向量可表示为

$$\begin{aligned} \hat{v}_1 &= \begin{pmatrix} -L_{g1} s\theta_1 & 0 \\ L_{g1} c\theta_1 & 0 \end{pmatrix} \dot{q}, \\ \hat{v}_2 &= \begin{pmatrix} -L_1 s\theta_1 - L_{g2} s\theta_{12} & -L_{g2} s\theta_{12} \\ L_1 c\theta_1 + L_{g2} c\theta_{12} & L_{g2} c\theta_{12} \end{pmatrix} \dot{q} \end{aligned}$$

式中, $q = (\theta_1, \theta_2)^T$ 。上式的 2×2 矩阵即式(2.277)的雅可比矩阵 $J_P^{(i)}$ ($i=1, 2$)。另外, 平面内的杆件 1 及杆件 2 的角速度表示为

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 = (1, 2) \dot{q}, \quad \omega_2 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 = (1, 1) \dot{q}$$

上式的 1×2 矩阵是式(2.277)的雅可比矩阵 $J_O^{(i)} = (1, 2)$ 。将雅可比矩阵代入式(2.281)中, 则得到惯性矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} m_1 L_{g1}^2 + \hat{I}_1 + m_2 (L_1^2 + L_{g2}^2 + 2L_1 L_{g2} c\theta_2) + \hat{I}_2 & m^2 (L_{g2}^2 + L_1 L_{g2} c\theta_1) + \hat{I}_2 \\ m^2 (L_{g2}^2 + L_1 L_{g2} c\theta_1) + \hat{I}_2 & m^2 (L_{g2}^2 + L_1 L_{g2} c\theta_1) + \hat{I}_2 \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} & m_2(L_{g2}^2 + L_1 L_{g2} c\theta_1) + \hat{I}_2 \\ & m_2 L_{g2}^2 + \hat{I}_2 \end{aligned} \right\}$$

式中, \hat{I}_i 为绕杆件 i 的质心的惯性矩。该惯性矩矩阵的各个元素是式(2.287)右边第一项的系数。根据式(2.288), 第二项的系数 h_{ijk} 为

$$\begin{aligned} h_{111} &= 0, h_{112} + h_{121} = -2m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2, \\ h_{122} &= -m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2, h_{211} = m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2, \\ h_{222} &= 0, h_{212} + h_{221} = 0 \end{aligned}$$

根据式(2.290)中的关系, 速度平方项归纳为

$$C(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} -m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix}$$

将 $J_{Pi}^{(j)}$ 及 $\bar{g} = (0, \bar{g})^T$ 代入式(2.291)中, 则重力项得到

$$\bar{g} = \begin{pmatrix} (m_1 L_{g1} + m_2 L_1) c\theta_1 + m_2 L_{g2} c\theta_{12} \\ m_2 L_{g2} c\theta_{12} \end{pmatrix} \bar{g}$$

式中, \bar{g} 为重力加速度。由于外力不起作用, 因此将 $M, C(q, \dot{q})\dot{q}, \bar{g}$ 代入式(2.289)中, 则得到运动方程式。

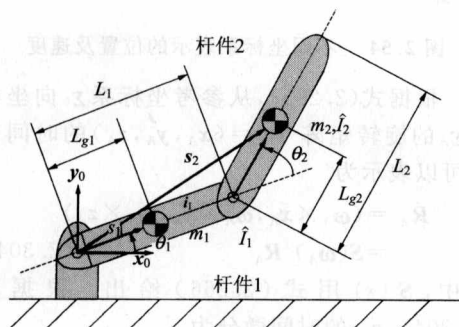


图 2.51 两关节机器人手臂的动力学

2. 牛顿-欧拉法

牛顿-欧拉法 (Newton-Euler formulation) 是将杆件相互的约束力及相对运动作为向量进行处理, 根据力与力矩的平衡来推导运动方程式。该方法的主要特征是必须考虑三维空间内的力与力矩的平衡, 但繁琐的计算少。特别是由 Luh 等^[5]推导出的递推公式被视为是一个应用于逆动力学 (inverse dynamics) 计算的高效率公式, 它的计算量与自由度 n 成正比。

利用牛顿-欧拉法求导机器人运动方程式的顺序如下:

① 给出关节的运动 q, \dot{q}, \ddot{q} , 从机器人基座一侧向末端依次计算杆件 i 的质心的角速

度 ω_i 、角加速度 $\dot{\omega}_i$ 、平移速度 \hat{v}_i 及平移加速度 $\dot{\hat{v}}_i$ 。

② 计算为了使各个杆件能实现①所要求的运动, 而应该加在质心上的力 F_i 和力矩 N_i 。

③ 从末端一侧向基座依次计算与作用在质心上的力和力矩平衡的作用于关节 $(i+1)$ 的力 f_i 和力矩 n_i , 并据此计算应该加在各个关节上的关节驱动力 τ 。

下面介绍与上述计算相关的关系式。

1) 旋转的位置向量的微分

以角速度向量 ω 旋转的刚体杆件上的点 P 的位置向量 $p(t)$ 的时间微分定义为

$$\frac{d}{dt}p(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{p(t+\delta t) - p(t)}{\delta t}$$

如图 2.52 所示, 其大小与 $\|p(t)\|$ 以及 $p(t+\delta t)$ 和 $p(t)$ 的夹角 $\Delta\theta = \|\omega\| \delta t$ 成正比, 因为 ω 与 $p(t)$ 两者正交, 因而可以表示为

$$\dot{v} = \dot{p} = \omega \times p \quad (2.295)$$

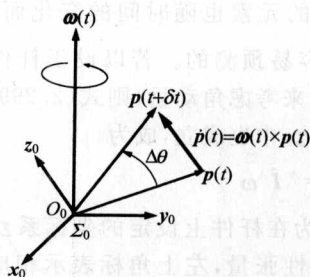


图 2.52 旋转的位置向量的时间变化

2) 杆件的惯性张量

如图 2.53 所示, 考虑绕参考坐标系原点 O_0 以一定的角速度 ω 旋转的刚体杆件的运动。杆件上的点 P 附近微小片 dm 的动量为 vdm , 绕原点的角动量为 $p \times vdm$ 。因而, 整个杆件的角动量 M 为:

$$M = \int_V p \times vdm \quad (2.296)$$

式中, \int_V 代表整个杆件的积分。将式(2.295)代入式(2.296)中, 并采用任意向量 $a, b, c \in R^3$ 的三重积公式 $a \times (b \times c) = (c^T a)b - (a^T b)c$, 得到

$$\begin{aligned} M &= \int_V ((p^T p)\omega - (p^T \omega)p) dm \\ &= \int_V ((p^T p)E_3 - pp^T) dm \omega \end{aligned} \quad (2.297)$$

式中, $E_3 \in R^{3 \times 3}$ 为单位矩阵。因而, 若设

$$\hat{I} = \int ((p^T p) E_3 - p p^T) \rho dv \quad (2.298)$$

则得到下式:

$$M = \hat{I} \omega \quad (2.299)$$

式中, ρ 为杆件的密度; dv 为微小片的体积。

将 \hat{I} 称为惯性张量 (inertial tensor)。

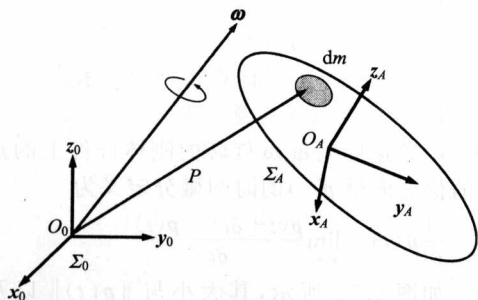


图 2.53 参考坐标及杆件坐标

由于若杆件的姿态随时间的变化而变化, 于是 \hat{I} 的元素也随时间的变化而变化, 因此 \hat{I} 是不容易预测的。若以设于杆件质心的坐标系 Σ_A 来考虑角动量, 则式 (2.299) 的关系在坐标系 Σ_A 中也成立, 成为

$${}^A M = {}^A \hat{I} \omega \quad (2.300)$$

式中, ${}^A \hat{I}$ 为在杆件上设定的坐标系 Σ_A 所表示的常数惯性张量, 左上角标表示相应的坐标系。现在, 设用坐标系 Σ_A 表示点 P 的位置向量为 ${}^A p = ({}^A p_x, {}^A p_y, {}^A p_z)$, 则 ${}^A \hat{I}$ 用下式给出:

$${}^A \hat{I} = \begin{bmatrix} \int_V ({}^A p_y^2 + {}^A p_z^2) \rho dv & -\int_V {}^A p_x {}^A p_y \rho dv & -\int_V {}^A p_x {}^A p_z \rho dv \\ -\int_V {}^A p_x {}^A p_y \rho dv & \int_V ({}^A p_x^2 + {}^A p_z^2) \rho dv & -\int_V {}^A p_y {}^A p_z \rho dv \\ -\int_V {}^A p_x {}^A p_z \rho dv & -\int_V {}^A p_y {}^A p_z \rho dv & \int_V ({}^A p_x^2 + {}^A p_y^2) \rho dv \end{bmatrix} \quad (2.301)$$

另外, 设从参考坐标系向坐标系 Σ_A 的旋转矩阵为 ${}^0 R_A$, 则根据 $M = {}^0 R_A {}^A M$ 及 $\omega = {}^0 R_A {}^A \omega$ 的关系, 得到

$${}^A \hat{I} = ({}^0 R_A)^T \hat{I}^0 R_A \quad (2.302)$$

3) 平移/旋转坐标系的关系

如图 2.54 所示, 设参考坐标系 $\Sigma_0 = \{x_0,$

$y_0, z_0\}$ 、平移/旋转坐标系分别为 $\Sigma_A = \{x_A, y_A, z_A\}$ 及坐标系 $\Sigma_B = \{x_B, y_B, z_B\}$, 研究它们之间速度和加速度的关系。设 ω_A 为用参考坐标表示的 Σ_A 的角速度向量, p_A 为从 Σ_0 的原点到 Σ_A 的原点的位置向量, p_B 为从 Σ_0 的原点到 Σ_B 的原点的位置向量, p_{AB} 为从 Σ_A 的原点到 Σ_B 的原点的位置向量, 对于这些位置向量有下列的关系:

$$p_B = p_A + p_{AB} \quad (2.303)$$

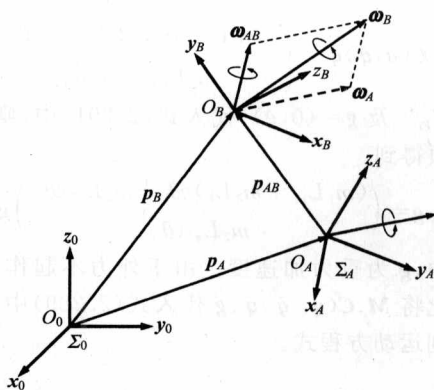


图 2.54 不同坐标系表示的位置及速度

根据式 (2.295), 从参考坐标系 Σ_0 向坐标系 Σ_A 的旋转矩阵 ${}^0 R_A = (x_A, y_A, z_A)$ 的时间微分可以表示为

$$\begin{aligned} {}^0 \dot{R}_A &= (\omega_A \times x_A, \omega_A \times y_A, \omega_A \times z_A) \\ &= S(\omega_A) {}^0 R_A \end{aligned} \quad (2.304)$$

式中, $S(*)$ 用式 (2.266) 给出。根据式 (2.304), p_{AB} 的时间微分为

$$\dot{p}_{AB} = \frac{d({}^0 R_A {}^A p_{AB})}{dt} = {}^0 R_A {}^A \dot{p}_{AB} + \omega_A \times p_{AB}$$

式 (2.303) 的时间微分为

$$\dot{p}_B = \dot{p}_A + {}^0 R_A {}^A \dot{p}_{AB} + \omega_A \times p_{AB} \quad (2.305)$$

再进一步, 式 (2.305) 的时间微分为

$$\begin{aligned} \ddot{p}_B &= \ddot{p}_A + {}^0 R_A {}^A \ddot{p}_{AB} + 2\omega_A \times {}^0 R_A {}^A \dot{p}_{AB} \\ &\quad + \dot{\omega}_A \times p_{AB} + \omega_A \times (\omega_A \times p_{AB}) \end{aligned} \quad (2.306)$$

式 (2.306) 右边第三项为哥氏加速度, 第五项为向心加速度。

另外, 设 ω_B 为用参考坐标表示的 Σ_B 的角速度向量, ω_{AB} 为用参考坐标表示的 Σ_B 相对于 Σ_A 的角速度向量, 则有

$$\omega_B = \omega_A + \omega_{AB} \quad (2.307)$$

角加速度为将式 (2.307) 的时间进行微

分,即

$$\dot{\omega}_B = \dot{\omega}_A + {}^0R_A^A \dot{\omega}_{AB} + \omega_A \times {}^0R_A^A \omega_{AB} \quad (2.308)$$

4) 杆件坐标系的相对关系

在改进D-H方法(Denavit-Hartenberg)^[6]的过程中,在杆件*i*上设定坐标系 $\Sigma_i = \{x_i, y_i, z_i\}$,现考虑当受如图2.55所示的力、力矩作用时相邻杆件之间的运动。注意,在D-H方法^[7]中,坐标系*i*设定在杆件*i*的末端一侧,而在改进D-H方法中,坐标系*i*设定在杆件*i*的基座一侧。定义下述符号为

p_i :从 Σ_0 的原点到 Σ_i 的原点的向量

s_i :从 Σ_0 的原点到杆件*i*的质心的向量

\hat{s}_i :从 Σ_i 的原点到杆件*i*的质心的向量

\hat{p}_i :从 Σ_{i-1} 的原点到 Σ_i 的原点的向量

f_i :从杆件*i-1*向杆件*i*施加的力

n_i :从杆件*i-1*向杆件*i*施加的力矩

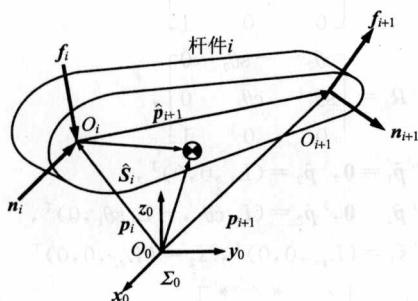


图 2.55 作用于杆件*i*的力和力矩

让 Σ_A 与 Σ_{i-1} 相对应, Σ_B 与 Σ_i 相对应,试求相邻杆件的相对运动。如果关节*i*是旋转关节, Σ_i 相对于 Σ_{i-1} 的相对角速度向量为 $z_i \dot{q}_i$,平移速度向量为 0 ,因而有对应关系: ${}^0R_A^A \dot{\omega}_{AB} \rightarrow z_i \dot{q}_i$, ${}^0R_A^A \dot{\omega}_{AB} \rightarrow z_i \ddot{q}_i$, ${}^0R_A^A p_{AB} \rightarrow \hat{p}_i$, ${}^0R_A^A \dot{p}_{AB} \rightarrow 0$, ${}^0R_A^A \ddot{q}_{AB} \rightarrow 0$,角速度及角加速度为

$$\omega_i = \omega_{i-1} + z_i \dot{q}_i \quad (2.309a)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + z_i \ddot{q}_i + \omega_{i-1} \times z_i \dot{q}_i \quad (2.309b)$$

再设 v_i 为用参考坐标表示的 Σ_i 原点的平移速度,即 $\dot{p}_i = v_i$,则平移速度及平移加速度为

$$v_i = v_{i-1} + \omega_{i-1} \times \hat{p}_i \quad (2.310a)$$

$$\dot{v}_i = \dot{v}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times \hat{p}_i + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times \hat{p}_i) \quad (2.310b)$$

如果关节*i*为移动关节, Σ_i 对 Σ_{i-1} 的相对角速度向量为 0 ,平移速度向量为 $z_i \dot{q}_i$,因而有对应关系: ${}^0R_A^A \dot{\omega}_{AB} \rightarrow 0$, ${}^0R_A^A \dot{\omega}_{AB} \rightarrow 0$, ${}^0R_A^A p_{AB}$

$\rightarrow \hat{p}_i$, ${}^0R_A^A \dot{p}_{AB} \rightarrow z_i \dot{q}_i$, ${}^0R_A^A \ddot{p}_{AB} \rightarrow z_i \ddot{q}_i$,角速度及角加速度为

$$\omega_i = \omega_{i-1} \quad (2.311a)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} \quad (2.311b)$$

平移速度及平移加速度为

$$v_i = v_{i-1} + z_i \dot{q}_i + \omega_{i-1} \times \hat{p}_i \quad (2.312a)$$

$$\dot{v}_i = \dot{v}_{i-1} + z_i \ddot{q}_i + 2\omega_{i-1} \times z_i \dot{q}_i + \dot{\omega}_{i-1} \times \hat{p}_i + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times \hat{p}_i) \quad (2.312b)$$

同样,使 Σ_A 与 Σ_i 相对应, Σ_B 与将 Σ_i 平行移动到质心的坐标系相对应,于是杆件*i*质心的平移加速度为

$$\ddot{s}_i = \dot{v}_i + \dot{\omega}_i \times \hat{s}_i + \omega_i \times (\omega_i \times \hat{s}_i) \quad (2.313)$$

利用这些关系式,可以求出从基座到末端的各个杆件的运动。

5) 牛顿-欧拉法递推公式

关于杆件*i*的牛顿-欧拉式用下式表示:

$$F_i = m_i \ddot{s}_i \quad (2.314)$$

$$N = \frac{d}{dt}(\hat{I}_i \omega_i) = \hat{I}_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (\hat{I}_i \omega_i) \quad (2.315)$$

式中, m_i 为杆件*i*的质量; \hat{I}_i 为杆件*i*质心的惯性张量; F_i 为作用于杆件*i*的力的总和; N_i 为作用于杆件*i*的力矩的总和。它们都用参考坐标表示。式(2.314)表示的就是牛顿第二定律,即“物体动量随时间变化的比例与作用于该物体的力相等”。式(2.315)表示的就是欧拉运动方程式,即“物体角动量随时间的变化与作用于该物体的力矩相等”。如图2.55所示,从杆件*i-1*对杆件*i*施加的力 f_i 及力矩 n_i 的平衡关系中,即有

$$F_i = f_i - f_{i+1} \quad (2.316a)$$

$$N_i = n_i - n_{i+1} - \hat{s}_i \times f_i + (\hat{s}_i - \hat{p}_{i+1}) \times f_{i+1} \quad (2.316b)$$

将式(2.309)~式(2.313)代入式(2.316a)和式(2.316b),求出 f_i 和 n_i ,即可得

$$f_i = m_i \dot{v}_i + \dot{\omega}_i \times m_i \hat{s}_i + \omega_i \times (\omega_i \times m_i \hat{s}_i) + f_{i+1} \quad (2.317a)$$

$$n_i = \hat{I}_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (\hat{I}_i \omega_i) + m_i \hat{s}_i \times \dot{v}_i + \hat{p}_{i+1} \times f_{i+1} + n_{i+1} \quad (2.317b)$$

使用式(2.317a)和式(2.317b),能够从末端向基座依次计算出 f_i 和 n_i 。 f_{n+1} 和 n_{n+1} 为作用于末端杆件上的力和力矩。若关节为旋转

关节,由于关节驱动力 τ_i 与 n_i 的 z_i 轴方向分量平衡,若关节为移动关节,由于关节驱动力 τ_i 与 f_i 的 z_i 轴方向分量平衡,因此关节驱动力 τ_i 为

$$\tau_i = \begin{cases} z_i^T n_i & (\text{旋转关节时}) \\ z_i^T f_i & (\text{移动关节时}) \end{cases} \quad (2.318)$$

与 f_i 及 n_i 的 z_i 轴分量以外的分量平衡的力是自然发生的约束力。

根据以上关系,虽然能够计算出关节驱动力,但由于 \hat{I}_i 随杆件 i 的运动而变化,因此显然变换为用 Σ_i 表示的式子更加有利于计算。另外,根据平行轴的定理,杆件 i 质心的惯性张量 I_i 与 Σ_i 原点的惯性张量 I_i 存在下列关系:

$$I_i = \hat{I}_i + m_i (\hat{s}_i^T \hat{s}_i E_3 - \hat{s}_i \hat{s}_i^T) \quad (2.319)$$

式中, $E_3 \in R^{3 \times 3}$ 为单位矩阵。因此,若借助于 I_i 整理为用 Σ_i 表示的式子,则得到如表 2.3 所示的牛顿-欧拉法的计算算法^[8]。表 2.3 中的 $\alpha_i, \theta_i, d_i, a_i$ 为改进后的 D-H 参数。即 θ_i 为绕 z_{i-1} 轴的从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴的角度, d_i 为沿 z_i 轴的从 x_{i-1} 轴到 x_i 的距离, α_i 为绕 x_{i-1} 轴的从 z_{i-1} 轴到 z_i 轴的角度, a_i 为沿 x_{i-1} 轴的从 z_{i-1} 到 z_i 轴的距离。如果关节 i 为旋转关节,则 $q_i = \theta_i$; 如果关节 i 为移动关节,则 $q_i = d_i$ 。如果机器人的关节全部是旋转关节,那么这里所列出的牛顿-欧拉法所需要的计算量为:乘法为 $(126n-99)$ 次,加法为 $(106n-92)$ 次(例如, $n=6$ 时,乘法是 657 次,加法是 544 次)。可见与拉格朗日法相比,该方法的计算效率高。

表 2.3 利用牛顿-欧拉法的逆动力学计算算法

步骤 1 给出杆件参数及动力学参数,进行初始设定。

$${}^0\omega_0 = {}^0\dot{\omega}_0 = 0, {}^0\dot{v}_0 = -\bar{g}$$

$${}^{n+1}f_{n+1} = {}^{n+1}f_H, {}^{n+1}n_{n+1} = {}^{n+1}n_H, {}^iz_i = [0, 0, 1]^T$$

$$\rho_i = \begin{cases} 1 & (\text{旋转关节时}) \\ 0 & (\text{移动关节时}) \end{cases}$$

$${}^{i-1}\hat{p}_i = [a_i, -d_i s\alpha_i, d_i c\alpha_i]^T$$

$${}^{i-1}R_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 \\ c\alpha_i s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i \\ s\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i c\theta_i & c\alpha_i \end{bmatrix}$$

步骤 2 正向计算 ($i = 1, 2, \dots, n$)

$${}^i\omega_i = {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\omega_{i-1} + \rho_i {}^iz_i \dot{q}_i$$

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + \rho_i \{ {}^iz_i \ddot{q}_i + {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^iz_i \dot{q}_i \}$$

续表 2.3

$$\begin{aligned} {}^i\dot{v}_i &= {}^iR_{i-1} [{}^{i-1}\dot{v}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i \\ &\quad + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i)] \\ &\quad + (\rho_i - 1) [{}^iz_i \ddot{q}_i + 2 {}^iR_{i-1} {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^iz_i \dot{q}_i] \end{aligned}$$

步骤 3 逆向计算 ($i = n, n-1, \dots, 1$)

$$\begin{aligned} {}^i f_i &= m_i {}^i\dot{v}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times m_i {}^i\hat{s}_i \\ &\quad + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times m_i {}^i\hat{s}_i) + {}^iR_{i-1} {}^{i+1}f_{i+1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^i n_i &= {}^iI_i {}^i\dot{\omega}_i + {}^i\omega_i \times ({}^iI_i \omega_i) + m_i {}^i\hat{s}_i \times {}^i\dot{v}_i \\ &\quad + {}^iR_{i+1} [{}^{i+1}\hat{p}_{i+1} \times {}^{i+1}f_{i+1} + {}^{i+1}n_{i+1}] \end{aligned}$$

$$\tau_i = \begin{cases} {}^iz_i^T n_i & (\text{旋转关节时}) \\ {}^iz_i^T f_i & (\text{移动关节时}) \end{cases}$$

【例题 2】利用牛顿-欧拉法,试求如图 2.51 所示的平面形两关节机器人手臂的运动方程式。以下式子中的 * 与转矩计算无关,因此其表示为不特指的元素。

步骤 1 根据机构的条件, $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^0\hat{p}_1 = 0, {}^1\hat{p}_2 = (L_1, 0, 0)^T,$$

$${}^1\hat{p}_1 = 0, {}^2\hat{p}_2 = (L_1 c\theta_1, -L_1 s\theta_1, 0)^T,$$

$${}^1\hat{s}_1 = (L_{g1}, 0, 0)^T, {}^2\hat{s}_2 = (L_{g2}, 0, 0)^T$$

$${}^1I_1 = \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & I_1 \end{bmatrix},$$

$${}^2I_2 = \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & I_2 \end{bmatrix}$$

由于没有作用于末端的外力,因此

$${}^3f_3 = 0, {}^3n_3 = 0$$

运动的初始条件为

$${}^0\omega_0 = {}^0\dot{\omega}_0 = 0, {}^0\dot{v}_0 = (0, \bar{g}, 0)^T$$

步骤 2 正向计算角速度、角加速度、平移加速度。首先,在 $i=1$ 时,得到下式:

$${}^1\omega_1 = {}^1R_0 {}^0\omega_0 + {}^1z_1 \dot{\theta}_1 = (0, 0, \dot{\theta}_1)^T$$

$$\begin{aligned} {}^1\dot{\omega}_1 &= {}^1R_0 {}^0\dot{\omega}_0 + {}^1z_1 \ddot{\theta}_1 + {}^1R_0 {}^0\omega_0 \times {}^1z_1 \dot{\theta}_1 \\ &= (0, 0, \ddot{\theta})^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^1\dot{v}_1 &= {}^1R_0 [{}^0\dot{v}_0 + {}^0\dot{\omega}_0 \times {}^0\hat{p}_1 + {}^0\omega_0 \times ({}^0\omega_0 \times \\ &\quad {}^0\hat{p}_1)] \end{aligned}$$

$$= (\bar{g} s\theta_1, \bar{g} c\theta_1, 0)^T$$

同样,设 $i=2$,得到下式:

$$\begin{aligned}
{}^2\omega_2 &= (0, 0, \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^\top \\
{}^2\dot{\omega}_2 &= (0, 0, \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)^\top \\
{}^2\dot{v}_2 &= (\tilde{g}s\theta_{12} + L_1(-\dot{\theta}_1^2 c\theta_2 + \ddot{\theta}_1 s\theta_2), \\
&\quad \tilde{g}c\theta_{12} + L_1(\dot{\theta}_1^2 s\theta_2 + \ddot{\theta}_1 c\theta_2), 0)^\top
\end{aligned}$$

步骤3 逆向计算力、力矩、转矩。首先, 设 $i=2$, 得到下式:

$$\begin{aligned}
{}^2f_2 &= m_2 {}^2\dot{v}_2 + {}^2\dot{\omega}_2 \times m_2 {}^2\hat{s}_2 \\
&\quad + {}^2\omega_2 \times ({}^2\omega_2 \times m_2 {}^2\hat{s}_2) + {}^2R_3 {}^3f_3 \\
&= m_2 \begin{bmatrix} \tilde{g}s\theta_{12} + L_1(-\dot{\theta}_1^2 c\theta_2 + \ddot{\theta}_1 s\theta_2) - L_{g2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ \tilde{g}c\theta_{12} + L_1(\dot{\theta}_1^2 s\theta_2 + \ddot{\theta}_1 c\theta_2) + L_{g2}(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \\
{}^2n_2 &= {}^2I_2 {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2\omega_2 \times ({}^2I_2 {}^2\omega_2) \\
&\quad + m_2 {}^2\hat{s}_2 \times {}^2\dot{v}_2 + {}^2R_3 [{}^3\hat{p}_3 \times {}^3f_3 + {}^3n_3] \\
&= (*, *, I_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 L_{g2}[\tilde{g}c\theta_{12} \\
&\quad + L_1(\dot{\theta}_1^2 s\theta_2 + \ddot{\theta}_1 c\theta_2)])^\top \\
\tau_2 &= {}^2z_2^T {}^2n_2 \\
&= I_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 L_{g2}[\tilde{g}c\theta_{12} + L_1(\dot{\theta}_1^2 s\theta_2 \\
&\quad + \ddot{\theta}_1 c\theta_2)]
\end{aligned}$$

类似地, 设 $i=1$, 得到下式:

$$\begin{aligned}
{}^1n_1 &= (*, *, (I_1 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 L_{g2} c\theta_2 \\
&\quad + I_2)\ddot{\theta}_1 + (m_2 L_1 L_{g2} c\theta_2 + I_2)\ddot{\theta}_2 \\
&\quad - m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
&\quad + \tilde{g}[(m_1 L_{g1} + m_2 L_1) c\theta_1 \\
&\quad + m_2 L_{g2} c\theta_{12}])^\top \\
\tau_1 &= {}^1z_1^T {}^1n_1 \\
&= (I_1 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 L_{g2} c\theta_2 + I_2)\ddot{\theta}_1 \\
&\quad + (m_2 L_1 L_{g2} c\theta_2 + I_2)\ddot{\theta}_2 - m_2 L_1 L_{g2} s\theta_2 \\
&\quad (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + \tilde{g}[(m_1 L_{g1} + m_2 L_1) c\theta_1 \\
&\quad + m_2 L_{g2} c\theta_{12}]
\end{aligned}$$

若将 τ_1, τ_2 进行整理, 则为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

式中, 上式左边第二项 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 及第三项 $g(q)$ 与例1的相应项一致, 但第一项的惯性矩阵为

$M=$

$$\begin{pmatrix} I_1 + m_2 L_1^2 + 2m_2 L_1 L_{g2} c\theta_2 + I_2 & m_2 L_1 L_{g2} c\theta_1 + I_2 \\ m_2 L_1 L_{g2} c\theta_1 + I_2 & I_2 \end{pmatrix}$$

这样可以确定, 在上式中, 若代入 $I_1 = \hat{I}_1 + m_1 L_{g1}^2, I_2 = \hat{I}_2 + m_2 L_{g2}^2$, 则与例1的惯性矩阵一致。这就表示, 若不是使用绕质心杆件的

惯性矩, 而是使用绕关节轴的惯性矩, 则式子可以简化。根据以上分析可以确定, 牛顿-欧拉法求得的运动方程式与拉格朗日法求得的运动方程式是一致的。

2.3.4 动态模型的基本特性

刚体手臂运动方程式具有以下的基本性质。

性质1 机器人手臂的惯性矩阵 $M(q)$ 是正值对称矩阵。

证明 机器人手臂的惯性矩阵用式(2.281)来表示。很明显, 它是非负值的对称矩阵。只要全部 m_i 和 \hat{I}_i 不为零, 则 $M(q)$ 为正值矩阵。一般来说, 该条件应该被满足。所以, 惯性矩阵 $M(q)$ 是正值对称矩阵。

性质2 机器人手臂的惯性矩阵 $M(q)$ 在满足下列任一条件的手臂结构时是有界的^[9]。

① 机器人手臂的全部关节是旋转关节。

② 任意的移动关节 k 的关节轴 z_k 与比它靠近基座一侧的全部旋转关节 j ($j < k$) 的关节轴 z_j 始终平行。

这里, 在惯性矩阵的全部元素对于任意的 $q \in R^n$ 是有界时, 则定义惯性矩阵为有界。

证明 根据式(2.281), 对于全部的 $1 \leq j \leq n$, 若 $J_{p_j}^{(i)}$ 及 $J_{o_j}^{(i)}$ 为有界, 则可以说惯性矩阵是有界的。根据式(2.279b), $J_{o_j}^{(i)}$ 始终是有界的。根据式(2.279a), 若 $z_j \times (s_i - p_j)$ 为有界, 则 $J_{p_j}^{(i)}$ 是有界的。现在考虑 $i=k$ 时的情况。在①的情况下, 由于 $(s_k - p_j)$ 为有界, 因此 $J_{p_j}^{(i)}$ 是有界的。在②的情况下, 由于 $(s_k - p_j)$ 的相对于 z_j 的正交分量为有界, 因此 $z_j \times (s_i - p_j)$ 为有界, 这样 $J_{p_j}^{(i)}$ 是有界的。所以, 惯性矩阵 $M(q)$ 在①或②的情况下是有界的。

在文献[9]中, 给出了有界惯性矩阵的矩阵范数的上限及下限。

性质3 通过对 $C(q, \dot{q})$ 进行适当定义, $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为变形对称矩阵^[10]。

证明 $C(q, \dot{q})$ 的元素 C_{ij} 虽然满足式(2.290), 但它的表示具有任意性。这里设

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ijk} \dot{q}_k \quad (2.320)$$

系数定义为

$$C_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} - \frac{\partial M_{ik}}{\partial q_j} \right) \quad (2.321)$$

这时,表示 C_{ij} 满足式(2.290)的关系。 C_{ijk} 称为 Christoffel symbol of the first type。根据 $M(q)$ 的对称性, $C_{ijk} = C_{ikj}$ 。这样,若定义 C_{ij} , 则对于任意向量 $x \in R^n$, 可以表示为 $x^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})) x = 0$ 。即 $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为位移对称矩阵。

根据该性质,可以推导出性质4,因此有时性质2也被视为机器人手臂的被动特性(passivity property)。

若使用关节速度向量 \dot{q} 来代替 x , 则对于任意的 \dot{q} 与 $C(q, \dot{q})$ 的定义无关,即有下列的关系:

$$\dot{q}^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})) \dot{q} = 0 \quad (2.322)$$

从以下的关系中可以证明这一点。即若使用式(2.280)及式(2.292),动能的时间微分可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} K &= \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M} \dot{q} + \dot{q}^T M \ddot{q} \\ &= \frac{1}{2} \dot{q}^T (\dot{M} - 2C) \dot{q} + \dot{q}^T (\tau - g - J^T(q) F_H) \end{aligned} \quad (2.323)$$

另外,根据能量守恒定律,动能的变化与作用机器人手臂关节的所有力所做的功相平衡,因此关系式 $\delta K = \delta q^T (\tau - g - J^T(q) F_H)$ 成立,于是可得到

$$\frac{d}{dt} K = \dot{q}^T (\tau - g - J^T(q) F_H) \quad (2.324)$$

根据式(2.323)及式(2.324),则式(2.322)成立。

性质4 式(2.289)所表示的机器人手臂,如果将关节转矩作为输入,将关节速度作为输出,则该输入、输出的被动性成立,即

$$\int_0^t \dot{q}(s)^T \tau(s) ds \geq -\gamma_0 \quad (2.325)$$

式中, γ_0 为适当的正常数。

证明 手臂的动能 K 与势能 P 的总和定义为 $E_r = K + P (\geq 0)$, 若计算沿解轨迹的时间微分,则根据式(2.289)及性质3为

$$\begin{aligned} \dot{E}_r(q, \dot{q}) &= \dot{q}^T \dot{M} \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M} \dot{q} + \frac{\partial P}{\partial q} \dot{q} \\ &= \dot{q}^T \tau \end{aligned}$$

根据上式关系,得

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{q}(s)^T \tau(s) ds &= \int_0^t \dot{E}_r ds \\ &= E_r(t) - E_r(0) \geq -E_r(0) = -\gamma_0 \end{aligned}$$

从而可表示出被动性。

性质5 动力学模型对于适当选择的动力学参数是线性的,即

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) \sigma \quad (2.326)$$

式中, $\sigma \in R^p$ 为动力学参数向量, $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) \in R^{n \times p}$ 为与 σ 有关的回归量^[11,12]。

证明 设将杆件 i 的惯性张量 I_i 的元素排列的向量为

$$I_{vi} = [I_{ixx}, I_{ixy}, I_{ixz}, I_{iyy}, I_{iyz}, I_{izz}]^T \in R^6 \quad (2.327)$$

对于任意的向量 $a \in R^3$, 设矩阵 $\Lambda(a)$ 为满足 $I_i a = \Lambda(a) I_{vi}$ 的矩阵,若设置杆件 i 的动力学参数为

$$\sigma_i = [m_i, m_i^i s_i^T, I_{vi}^T]^T \in R^{10} \quad (2.328)$$

则作用于杆件 i 的力及力矩可以用表2.3中的力及力矩的公式表示为

$$f_i = [{}^i \dot{v}_i, S({}^i \dot{\omega}_i) + S({}^i \omega_i) S({}^i \omega_i), 0] \sigma_i + {}^i R_{i+1}^{i+1} f_{i+1} \quad (2.329a)$$

$$n_i = [0, -S({}^i \dot{v}_i), \Lambda({}^i \dot{\omega}_i) + S({}^i \omega_i) \Lambda({}^i \omega_i)] \sigma_i + {}^i R_{i+1}^{i+1} \{ {}^{i+1} \hat{p}_{i+1} \times {}^{i+1} f_{i+1} + {}^{i+1} n_{i+1} \} \quad (2.329b)$$

式中, $S(*)$ 为用式(2.266)定义的变形对称矩阵。式(2.329a)和式(2.329b)表示 f_i 及 n_i 对于参数 $\sigma_j (i \leq j \leq n)$ 是线性的。关节转矩 τ_i 与这些力及力矩成正比。因而,关节转矩对于参数 $\sigma = [\sigma_1^T \sigma_2^T \cdots \sigma_n^T]^T$ 是线性的。

2.3.5 正动力学问题和高效计算

所谓正动力学(forward dynamics)问题,是在给出机器人的初始状态 $[q(0), \dot{q}(0)]$ 及关节驱动力 $\tau(t)$ 后求解机器人如何运动的问题,这是一个来自于计算机仿真的问题。该问题将机器人手臂的运动方程式

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.330)$$

变形为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ M^{-1}(q) (\tau - C(q, \dot{q}) \dot{q} - g(q)) \end{bmatrix} \quad (2.331)$$

若给出初始条件及输入,利用龙格-库塔-吉尔(Runge-Kutta-Gill)法即可求解。这时的要求是能高效率地计算 $M(q)$ 及 $C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q)$ 。Walker 及 Orin^[13] 利用表2.3的牛顿-欧拉法提出了一种称为单位向量法的高效算法。

将基于牛顿-欧拉法的关节驱动力计算

法作为函数,设 $\tau := JOTR(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 。此时若设关节加速度为零,计算关节转矩,则可求出 $C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) = b$ 。具体方法是

$$b := JOTR(q, \dot{q}, 0) \quad (2.332)$$

另外,若设 e_i 为第 i 个元素的单位向量(即 1),则 $M(q)$ 矩阵的第 i 列向量 m_i 可利用下式计算:

$$m_i := JOTR(q, \dot{q}, e_i) - b \quad (2.333)$$

因此,通过将角加速度按照 $e_1 \sim e_n$ 依次代入函数 $JOTR$, 求出 m_1, m_2, \dots, m_n , 就能够计算 $M(q)$ 。其计算量为函数 $JOTR$ 的 $n+1$ 倍。

在基于模型的机器人控制中也用到惯性矩阵的计算,这时要求进行高速运算。关于惯性矩阵的高效算法,最早由 Walker 和 Orin^[13] 提出过组合体(composite body)算法,后来又出现过多种计算的方法^[14~18]。表 2.4 所示为 Kawasaki 等^[16] 提出的惯性矩阵计算算法。该算法是利用机器人手臂的基座参数(base parameter),以高效计算为目标而导出的,但 Lin 等^[19] 又提出基于一般动力学参数的计算方法。统计具有 n 个自由度机器人手臂的计算量,其中用到乘法的为 $(11n^2 + 15n - 41)$ 次,加法为 $(7n^2 + 32n - 66)$ 次。这与 Walker 及 Orin 的算法^[13] 相比,计算量减少了 40% 左右。

表 2.4 刚性臂的惯性矩阵计算算法

步骤 1 初始值设定

$$z_i = (0, 0, 1)^T, L_n = {}^n I_n, {}^n k_n = {}^n I_n z_n, {}^n h_{n+1} = 0, v_i = \sum_{k=i}^n m_k$$

步骤 2 $i = n, n-1, \dots, 2$ 的计算

$${}^{i-1} h_i = v_i {}^{i-1} p_i + {}^{i-1} R_i (m_i {}^i s_i + {}^i h_{i+1} {}^{i+1} z_i)$$

步骤 3 $i = n-1, n-2, \dots, 1$ 的计算

$$B_i = {}^i h_{i+1} {}^{i+1} z_i - \frac{1}{2} v_{i+1} {}^i p_{i+1}$$

$$L_i = {}^i I_i - S(B_i) S({}^i p_{i+1}) - [S(B_i) S({}^i p_{i+1})]^T + {}^i R_{i+1} L_{i+1} {}^{i+1} z_i$$

$${}^i k_i = L_i z_i$$

$$M_{ii} = \begin{cases} z_i^T {}^i k_i & (\text{旋转关节时}) \\ v_i & (\text{移动关节时}) \end{cases}$$

步骤 4 $i = n, n-1, \dots, 2$ 的计算

步骤 4.1 关节 i 是旋转关节时

$${}^{i-1} w_i = ({}^{i-1} h_i - v_i {}^{i-1} p_i) \times {}^{i-1} z_i$$

$j = i-1, i-2, \dots, 1$ 的计算

$${}^j k_i = {}^j w_i \times {}^j p_{j+1} + {}^j R_{j+1} {}^{j+1} k_j$$

$$M_{ij} = z_j^T (\rho_j {}^j k_i + (1 - \rho_j) {}^j w_i)$$

$${}^{j-1} w = {}^{j-1} R_j {}^j w_i$$

续表 2.4

步骤 4.2 关节 i 是移动关节时

$j = i-1, i-2, \dots, 1$ 的计算

$$M_{ij} = z_j^T [\rho_j {}^j h_i^{i+1} + (1 - \rho_j) v_i {}^i z_i]$$

$${}^j h_i^{i+1} = {}^j p_{j+1} + {}^j R_{j+1} {}^{j+1} h_i^{i+2}$$

$${}^j z_i = {}^j R_{j+1} {}^{j+1} z_i$$

2.3.6 笛卡儿空间的动力学模型

下面试图将关节空间的运动方程式变换为笛卡儿空间(Cartesian space)的运动方程式。若将式(2.269)进行时间微分,得到

$$\ddot{r} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (2.334)$$

若 $n=m$, 当雅可比矩阵 $J(q)$ 为正则矩阵时,得到下列的关系式:

$$\dot{q} = J(q)^{-1} \dot{r} \quad (2.335a)$$

$$\ddot{q} = J(q)^{-1} (\ddot{r} - \dot{J}(q) J^{-1}(q) \dot{r}) \quad (2.335b)$$

若将式(2.335a)和式(2.335b)代入式(2.330)中,则得到

$$M_r(q)\ddot{r} + C_r(q, \dot{q})\dot{r} + g_r(q) = J(q)^{-T} \tau \quad (2.336)$$

式中, $J(q)^{-T}$ 为逆矩阵的转置矩阵,有

$$\left. \begin{aligned} M_r &= J^{-T} M J^{-1} \\ C_r &= (J^{-T} C - M_r \dot{J}) J^{-1} \\ g_r &= J^{-T} g \end{aligned} \right\} \quad (2.337)$$

笛卡儿空间的动力学与关节空间的动力学相同,具有本书中如 2.3.4 节中所归纳的基本性质。但是,若机器人手臂接近奇异点,则会有若干个变量变成无穷大,这一点要务必注意。

如果机器人手臂冗余,即 $n > m$, 则不存在雅可比矩阵的逆矩阵。在这样的情况下,可采用雅可比矩阵 J 的广义逆矩阵 $J^+ = J^T (J J^T)^{-1}$, 于是实现末端速度 \dot{r} 的关节速度由下式给出:

$$\dot{q} = J^+ \dot{r} + (E_n - J^+ J) w \quad (2.338)$$

式中, $E_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为单位矩阵; $w \in \mathbb{R}^n$ 为任意的常数向量。式(2.338)表示,由于关节数是冗余的,因此决定了末端速度存在着无数个解。 w 可利用来进行优化,关节驱动力和关节速度为最小。在 $w=0$ 时,用 J^+ 代替 J^{-1} 代入式(2.335)~式(2.337)中便能求出笛卡儿空间的运动方程式。

2.3.7 闭式链机构的动力学

闭式链机构(closed link mechanism)是从

某一个构件起至少具有一条返回起始构件的路径,而非与相邻构件逆行的连杆机构。闭式链机构的分析如图 2.56 所示那样,是根据假想树状结构(tree structured link mechanism)^[20,21]的连杆机构来进行分析,即假设在闭环中的适当位置将关节切断,假定各个关节全部为主动关节来进行分析。这时的约束条件是假想树状结构的连杆机构实现的运动与原闭式链机构相同。设闭式链机构的广义坐标为 $q \in R^n$,广义力为 $\tau \in R^n$,设主动关节的关节变量为 $q_c \in R^{n_c}$,关节转矩为 $\tau_c \in R^{n_c}$ 。一般来说, $n_c \geq n$ 。再设假想树状结构连杆机构的关节变量为 $q_o \in R^n$,关节转矩为 $\tau_o \in R^n$ 。这时,由于广义坐标唯一确定全部关节的运动,因此可以表示为

$$q_o = q_o(q) \quad (2.339)$$

$$q_c = q_c(q) \quad (2.340)$$

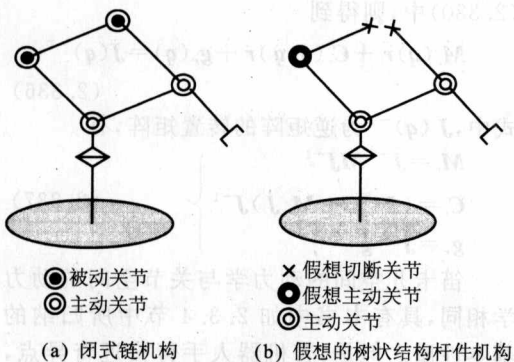


图 2.56 闭式链机构及假想树状结构连杆机构

若设 δq 、 δq_o 、 δq_c 分别为 q 、 q_o 、 q_c 的虚位移,根据虚功原理,具有下述的关系:

$$\tau^T \delta q = \tau_c^T \delta q_c = \tau_o^T \delta q_o \quad (2.341)$$

根据式(2.341),得到

$$\tau^T \delta q = \tau_c^T S \delta q = \tau_o^T W \delta q \quad (2.342)$$

式中,

$$S = \frac{\partial q_o}{\partial q} \in R^{n_c \times n}, \quad W = \frac{\partial q_c}{\partial q} \in R^{n_c \times n} \quad (2.343)$$

由于虚位移能够取任意值,故下式成立:

$$\tau = W^T \tau_o \quad (2.344a)$$

$$\tau = S^T \tau_c \quad (2.344b)$$

如果无驱动冗余性 ($n_c = n$),由于设计中闭式链机构的运动通常都被驱动器的配置所唯一决定,因此 S 可以假定为正则矩阵。所以,根据式(2.334),可以得到下述的关系式:

$$\tau_c = S^{-T} W^T \tau_o \quad (2.345)$$

特别是,在 $q = q_c$ 的条件下,由于 S 为单位矩阵,故式(2.345)成为

$$\tau_c = W^T \tau_o \quad (2.346)$$

上述公式表明,根据假想树状结构连杆机构的关节转矩能够计算闭式链机构的关节转矩。

反之,如果存在驱动的冗余性 ($n_c > n$), S 虽然不是正则矩阵,但对于任意的 δq ,由于在设计中通常是不将 δq_c 设为零,故可以假定为 $\text{rank } S = n$ 。于是存在多个满足式(2.334)的 τ_c 的解,它的通解可以表示为

$$\tau_c = (WS^+)^T \tau_o + (E_{n_c} - SS^+)^T w \quad (2.347)$$

式中, S^+ 为 S 广义逆矩阵; $E_{n_c} \in R^{n_c \times n_c}$ 为单位矩阵; $w \in R^{n_c}$ 为任意向量。若利用 w 以减少闭式链机构的动态关节转矩和对运动进行优化,则能够有效地利用冗余特性。

【例题 3】 试求如图 2.57 所示的两自由度平行连杆机构的驱动关节转矩与切断关节 3' 后的假想的树状开式链结构的关节转矩之间的关系。图 2.57 中阴影线表示的关节 1 及关节 1' 是驱动关节,关节 2 和 2' 以及 3' 是非驱动关节。

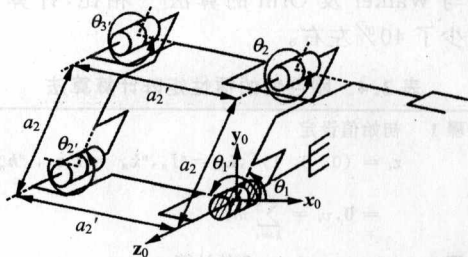


图 2.57 两自由度平行连杆机构

若主动关节的关节变量选择广义坐标,则关节位移分别表示为

$$q = q_c = (\theta_1, \theta_{1'})^T, \quad q_o = (\theta_1, \theta_2, \theta_{1'}, \theta_{2'})^T$$

由于 q 与 q_o 有下述的关系:

$$q_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} q + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \pi \\ \pi \end{bmatrix}$$

因此, W 表示为

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

所以,若假想树状开式链机构的关节矩阵为 $\tau_0 = (\tau_1, \tau_2, \tau_{1'}, \tau_{2'})^T$, 则根据式(2.346), 得到

$$\tau_c = \begin{pmatrix} \tau_1 + \tau_{1'} \\ \tau_2 + \tau_{2'} - \tau_{2'} \end{pmatrix}$$

2.3.8 受末端约束的机器人手臂动力学

下面讨论在机器人末端受到环境约束的条件下如何求解动力学的问题。如图 2.58 所示, 设末端有环境约束, 受到来自环境的力和力矩 $F_H \in R^m$ 。在这里, 我们假设在约束面上没有摩擦作用。受到这样的约束时, 由于约束力属于作用于末端的外力, 因此其运动方程式表示为

$$M\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau - \tau_H \quad (2.348)$$

式中, $\tau_H \in R^n$ 为与来自环境的阻力 F_H 等效的关节驱动力, 并且满足 $\tau_H = J^T(q)F_H$ 。机器人的运动另外附加了与环境之间的几何学约束条件, 运动自由度将减少。但是倒是能够利用约束来适当降低动力学模型的阶数^[22]。末端约束条件用下式给出:

$$\varphi(q) = 0 \in R^l \quad (2.349)$$

$\varphi(q)$ 是连续函数, 可以对 q 进行微分。末端受到的环境阻力指向约束曲面的法线方向。与该阻力等效的关节转矩可以表示为

$$\tau_H = J_\varphi^T(q)\lambda \quad (2.350)$$

式中, $\lambda \in R^l$ 为约束面决定的拉格朗日乘数; $J_\varphi(q)$ 为根据约束几何条件求出的雅可比矩阵, 它的定义如下:

$$J_\varphi(q) = \frac{\partial \varphi(q)}{\partial q} \in R^{l \times n} \quad (2.351)$$

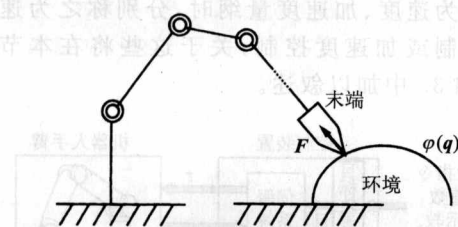


图 2.58 受到末端约束的机器人手臂

若将式(2.349)对时间进行微分, 则根据 $\dot{\varphi}(q) = J_\varphi(q)\dot{q} = 0$, 机器人的动力学可以看成是被限制在下面的 $2n$ 维约束簇 S 中:

$$S = \{(q, \dot{q}) : \varphi(q) = 0, J_\varphi(q)\dot{q} = 0\} \quad (2.352)$$

再对 $J_\varphi(q)\dot{q} = 0$ 的两边左乘 λ^T , 得到

$$\tau_H^T \dot{q} = 0 \quad (2.353)$$

式(2.353)表示在关节空间中速度与阻力垂直。在受到 l 维环境约束的条件下, 末端的自由度成为 $n-l$ 。因此, 将关节向量适当分解为自由变量及从属变量这两个分向量

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (2.354)$$

式中, $q_1 \in R^{n-l}$ 为自由变量; $q_2 \in R^l$ 为从属变量。若将约束条件对时间进行微分, 则根据下式的关系:

$$\frac{d\varphi(q)}{dt} = \frac{\partial \varphi(q)}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \varphi(q)}{\partial q_2} \dot{q}_2 = 0 \quad (2.355)$$

再假设 $\partial \varphi(q) / \partial q_2 \in R^{l \times l}$ 为正则矩阵, 则下式成立:

$$\dot{q} = L(q)\dot{q}_1 \quad (2.356)$$

其中,

$$L(q) = \begin{bmatrix} E \\ -\left(\frac{\partial \varphi(q)}{\partial q_2}\right)^{-1} \frac{\partial \varphi(q)}{\partial q_1} \end{bmatrix} \in R^{n \times (n-l)} \quad (2.357)$$

$E \in R^{(n-l) \times (n-l)}$ 为单位矩阵。式(2.356)表示, 若决定了自由变量, 即可以求出从属变量。因此, 从属变量是自由变量的函数, 具有下述的关系:

$$q_2 = \Omega(q_1) \quad (2.358)$$

另外, 从式(2.353)和式(2.356)得到 $\tau_H^T L(q)\dot{q}_1 = 0$ 。由于此式经常成立, 故可以推导出下式:

$$\tau_H^T L(q) = 0 \quad (2.359)$$

另外, 式(2.356)的时间微分为

$$\ddot{q} = L(q)\ddot{q}_1 + \dot{L}(q)\dot{q}_1 \quad (2.360)$$

将式(2.360)代入式(2.348)中, 对两边左乘 $L^T(q)$, 则可以表示为

$$\begin{aligned} M_1(q_1)\ddot{q}_1 + C_1(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 + g_1(q_1) \\ = L^T(q_1)\tau \end{aligned} \quad (2.361)$$

式中, 有下列关系:

$$\begin{aligned} M_1 &= L^T M L \\ C_1 &= L^T (M \dot{L} + C L) \\ g_1 &= L^T g \end{aligned} \quad (2.362)$$

通过式(2.358), 式(2.362)中的矩阵及向量被置换成仅含 q_1 的式子。式(2.361)表示阻力未以显式表现出来的自由变量的运动方程式, 也属于受约束的机器人手臂的低阶动力学模型。若给出关节矩阵 τ , 则能够根

据式(2.361)的运动方程式计算 q_1 的运动,能够根据式(2.358)来计算 q_2 的运动。产生 q 运动的矩阵 $\tau_p \equiv \tau - \tau_H$, 可根据式(2.348)进行代数计算,阻力可由下式进行计算:

$$\tau_H = \tau - \tau_p \quad (2.363)$$

川崎晴久

2.4 手臂的控制

2.4.1 运动控制

机器人手臂通常都具有很高的机械刚性,可以认为它的弹性变形非常小。若将弹性变形忽略不计,则可以将其作为刚性臂来处理。本节叙述刚性臂在无约束的自由空间中运动的控制问题。对于手臂末端受到某种约束而产生的力控制问题将在 2.4.2 节中进行叙述。至于在手臂弹性变形不能被忽略条件下的柔性臂控制问题将安排在 2.6 节中进行介绍。

对于机器人手臂的运动来说,人们通常关注末端的运动,而末端运动乃是由各个关节的运动合成实现的。因而必须考虑手臂末端的位置、姿态与各个关节位移之间的关系。此外,手臂运动,不仅仅涉及末端从某个位置向另外一个位置的移动,有时也希望它能沿着特定的空间路径进行移动。为此,不仅要考虑手臂末端的位置,而且还必须顾及它的速度和加速度。若再进一步从控制的观点来看,机器人手臂是一个复杂的多变量非线性系统,各关节之间存在耦合,为了完成高精度运动,必须对相互的影响进行补偿。

在本节中,首先作为手臂运动控制的基本方法进行讨论。在本节 1. 中仅着眼于手臂各个关节运动的关系伺服控制和手臂末端运动的作业坐标伺服控制进行介绍,然后在 2.、3. 中就速度控制、加速度控制进行讲解,接着在 4. 中,介绍使手臂实际沿着轨迹移动的方法,在 5. 中讲述一般的多变量非线性系统的解耦控制,然后将该方法应用于机器人手臂的控制。最后,在本节 6. 中说明冗余自由度机器人手臂的控制问题。

1. 关节伺服和作业坐标伺服

现在来研究 n 个自由度的手臂,设关节位移以 n 维向量 $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T \in \mathcal{R}^n$ 表示, q_i 是第 i 个关节的位移,刚性臂的关节位

移和末端位置、姿态之间的关系以下式给出:

$$r = f_r(q) \quad (2.364)$$

$r \in \mathcal{R}^m$ 是某作业坐标系表示的 m 维末端向量,当它表示三维空间内的位置姿态时, $m=6$ 。如式(2.364)所示,对刚性臂来说,由于各关节的位移完全决定了手臂末端的位置姿态,故如欲控制手臂运动,只要控制各关节的运动即可。

设刚性臂的运动方程式如下所示(参阅 2.3 节):

$$\tau = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + \Gamma\dot{q} + g(q) \quad (2.365)$$

式中, $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 为手臂的惯性矩阵; $h(q, \dot{q}) \in \mathcal{R}^n$ 为表示离心力和哥氏力的向量, $\Gamma \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 为粘性摩擦系数矩阵; $g(q) \in \mathcal{R}^n$ 为表示重力项的向量; $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_n)^T \in \mathcal{R}^n$ 为关节驱动力向量。

机器人手臂的驱动装置是一个为了跟踪目标值对手臂当前运动状态进行反馈构成的伺服系统。无论何种伺服系统结构,控制装置的功能都是检测各关节的当前位置 q 及速度 \dot{q} , 将它们作为反馈信号,最后直接或间接地决定各关节的驱动力 τ 。

图 2.59 给出了控制系统的构成示意图。来自示教、数值数据或外传感器的信号等构成了作业指令,控制系统根据这些指令,在目标轨迹生成部分产生伺服系统需要的目标值。伺服系统的构成方法因目标值的选取方法的不同而异,大体上可以分为关节伺服和作业坐标伺服两种。当目标值为速度、加速度量纲时,分别称之为速度控制或加速度控制,关于这些将在本节 2. 和 3. 中加以叙述。

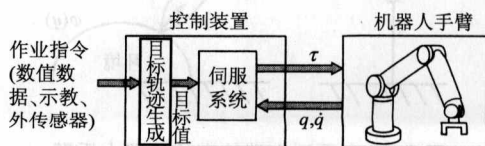


图 2.59 刚性臂控制系统的构成

1) 关节伺服控制

下面讨论以各关节位移的形式给定手臂运动目标值的情况。令关节的目标值为 $q_d = [q_{d1}, q_{d2}, \dots, q_{dn}]^T \in \mathcal{R}^n$ 。图 2.60 给出了关节伺服的构成。若目标值是以关节位移的形式

给出的,那么如图 2.60 所示,各个关节可以独立构成伺服系统,因此问题就变得十分简单。目标值 q_d 可以根据末端目标值 r_d 由式 (2.364) 的反函数,即逆运动学 (inverse kinematics) 的计算得出 (参阅 2.2 节)

$$q_d = f_r^{-1}(r_d) \quad (2.366)$$

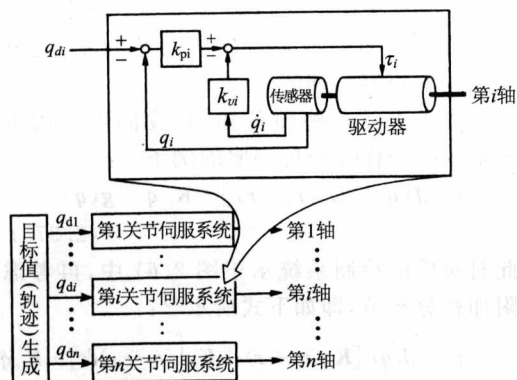


图 2.60 关节伺服构成举例

如果是工业机器人经常采用的示教方法,那么示教者实际上都是一面看着手臂末端,一面进行示教的,所以不必进行式 (2.366) 的计算, q_d 是直接给出的。如果想让手臂静止于某一个点,只要对 q_d 取定值即可,当欲使手臂从某个点向另一个点逐渐移动,或者使之沿某一轨迹运动时,则必须按时间的变化使 q_d 发生变化。此类轨迹控制将在本节 4. 中进行详述。

现在为了简便起见,假设驱动器的动态特性忽略不计,各个关节的驱动力 τ_i 可以直接给出。这时,最简单的一种伺服系统如下所示:

$$\tau_i = k_{pi}(q_{di} - q_i) - k_{vi}\dot{q}_i \quad (2.367)$$

k_{pi} 是比例增益, k_{vi} 是速度反馈增益。对于全部关节,可以将式 (2.367) 归纳表示为

$$\tau = K_p(q_d - q) - K_v\dot{q} \quad (2.368)$$

式中, $K_p = \text{diag}(k_{pi}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $K_v = \text{diag}(k_{vi}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 。这种关节伺服系统把每一个关节作为简单的单输入、单输出系统来处理,所以其结构简单,现在的工业机器人大部分都由这种关节伺服系统来控制。但是,从式 (2.365) 中可知,从手臂的动态特性来看,严格地说,每个关节都不是单输入、单输出系统,惯性项和速度项在关节彼此之间存在动态耦合。在式 (2.368) 所表示的关节伺服中,这些耦合均被

视为外部干扰来进行处理,为了减少外部干扰的影响,在保持稳定性范围内应该尽量将增益 k_{pi} 、 k_{vi} 设置得大一些。但是无论怎样加大增益,由于重力项的影响,手臂在静止状态下,各个关节仍会产生稳态误差,即将式 (2.368) 代入式 (2.369) 中,若 $\ddot{q} = \dot{q} = 0$,将产生下式所示的稳态误差 e :

$$e = q_d - q = K_p^{-1}g(q) \quad (2.369)$$

有时为了使稳态误差为零,可在式 (2.368) 中再加上积分项,构成

$$\tau = K_p(q_d - q) - K_v\dot{q} + K_i \int (q_d - q) dt \quad (2.370)$$

式中, $K_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为积分环节的增益矩阵,和 K_p 、 K_v 一样,它是一个对角矩阵。

传统上,上述伺服系统是用模拟电路构成的。近年来,由于微处理器和信号处理器等高性能、低价格的计算器件的普及,将伺服系统的一部分或全部改成数字电路的所谓软件伺服已经很普遍了。与模拟电路的情况相比,软件伺服能进行更精细的控制。例如,不再让各个关节的增益 k_{pi} 、 k_{vi} 固定不变,而是让其按照手臂不同姿态时所期望的响应特性而变化,用下式代替式 (2.370),通过对重力项的计算,直接实现重力项的补偿

$$\tau = K_p(q_d - q) - K_v\dot{q} + g(q) \quad (2.371)$$

在本章后续的内容中,都是在软件伺服假设的前提下展开讨论的。如后面所述,软件伺服系统方式还能有比式 (2.370) 和式 (2.371) 更高级的控制方法,但是即使使用式 (2.370) 和式 (2.371) 的简单的控制方法,闭环系统的平衡点 q_d 也能达到渐近稳定,即经过无限长的时间, q 能收敛于 q_d ^[1,2]。即在多数场合,式 (2.370) 和式 (2.371) 的控制方法已经足够了。

2) 作业坐标伺服控制

关节伺服控制的结构简单,对软件伺服来说,计算量少,采样时间较短,所以是工业机器人经常采用的方法,这一点已经在前面有所论述。但在自由空间内对手臂进行控制时,在很多场合都希望直接给出手臂末端位置、姿态运动的显式表达。例如,让手臂从某个点沿直线运动至另一个点就是这种情况。

在这种情况下,很自然会取末端姿态向量的目标值 r_d 作为手臂运动的目标值。一

且得到 r_d , 利用上述式(2.366)变换为 q_d , 当然也能应用关节伺服方式。但是, 为此不但需要事前求解末端目标值 r_d , 而且往往要在运动中对其加以在线修正, 于是必须实时计算式(2.366)的逆运动学方程式。此外, 因为在关节伺服系统中各个关节是独立受控的, 它们的实际响应结果导致的末端位置、姿态的响应比较难以预测, 而且为了得到期望的末端响应, 对各关节伺服系统的增益调节也十分困难。

因此, 现在我们来研究不将 r_d 变换为 q_d , 而把 r_d 本身作为目标值来构成伺服系统。由于在很多情况下, 末端位置、姿态 r_d 是用固定于空间内的某一个作业坐标系来描述的, 所以把以 r_d 作为目标值的伺服系统称作作业坐标伺服。下面举一个最简单的作业坐标伺服的例子。为此, 首先将式(2.364)的两边对时间进行微分, 由此可得下式:

$$\dot{r} = \frac{\partial f}{\partial q} \dot{q} = J(q) \dot{q} \quad (2.372)$$

式中, $J(q) \dot{q} = \partial f / \partial q^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 称之为雅可比矩阵, 雅可比矩阵为 q 的函数。 r 和 \dot{q} 通常如式(2.364)所示, 成非线性关系。与此相反, 由式(2.372)可知, \dot{r} 和 \dot{q} 为线性关系。式中 $J(q)$ 是 q 的函数。

根据式(2.372)和虚功原理, 可得下式(参阅2.4.2节):

$$\tau = J(q)^T f \quad (2.373)$$

式中, $J(q)^T$ 表示 $J(q)$ 的转置, 当 $m=6$ 时, $f = (f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)^T \in \mathbb{R}^6$, 是组合向量, 包括作业坐标系所描述的三维平移力向量和以欧拉角等描述的 r 的姿态所对应的三维旋转力向量, 式(2.373)表示与手臂末端的力和旋转力等效的各关节驱动力的关系式。若取欧拉角 (α, β, γ) 作为 r 的姿态分量, 则 m_x, m_y, m_z 为绕欧拉角各自旋转轴的力矩, 这从直观上非常难以理解。所以, 在机器人学中, 雅可比矩阵经常不是根据式(2.372), 而是根据速度的关系直接按照下式来定义:

$$s = (\dot{v}^T, \dot{\omega}^T)^T = J_s(q) \dot{q} \quad (2.374)$$

在式(2.374)中, 末端速度向量 s 的姿态分量不是姿态分量的时间微分描述, 而是用角速度向量 $\omega \in \mathbb{R}^3$ 来表示。不过, 在 s 中, $v \in \mathbb{R}^3$ 是末端的平移速度, 和 r 的位置分量的时间微分一致。式(2.374)的矩阵 $J_s(q)$ 也称

为雅可比矩阵, 它表示末端速度向量 s 与关节速度 \dot{q} 之间的关系。虽然它不是从式(2.372)原本的数学意义出发的, 但是在机器人学中通常称之为雅可比矩阵。

若采用式(2.374)所定义的雅可比矩阵, 对应于式(2.373)右边的 f 就成为 $(f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)^T \in \mathbb{R}^6$, f 的旋转力分量就变成绕三维空间内某些轴旋转的力矩向量, 这样从直觉就很容易理解。

有了上面一些预备知识, 我们可以用下式给出一个作业坐标伺服的例子^[3]:

$$\tau = J(q)^T [K_p(r_d - r)] - K_v \dot{q} + g(q) \quad (2.375)$$

此时对应的控制系统示于图2.61中, 再考虑附加积分环节, 即如下式所示^[2]:

$$\tau = J(q)^T [K_p(r_d - r) + K_i \int (r_d - r) dt] - K_v \dot{q} \quad (2.376)$$

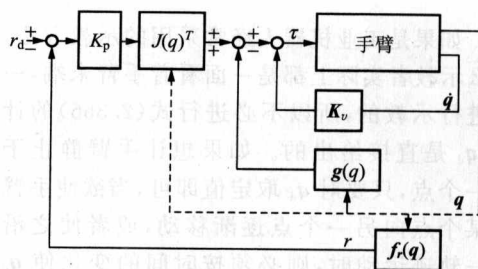


图 2.61 作业坐标伺服举例

如果将末端位置、姿态的误差向量 $r_d - r$ 分解成位置和姿态分量, 用 $[e_p^T, e_o^T]^T$ 表示, 各个分量可以用 $e_p = p_d - p, e_o = [\alpha_d - \alpha, \beta_d - \beta, \gamma_d - \gamma]^T$ 来表示。 $p \in \mathbb{R}^3$ 是末端位置向量, p_d 是目标值, (α, β, γ) 是欧拉角或横摇角、纵摇角、偏转角, $(\alpha_d, \beta_d, \gamma_d)$ 是其目标值。由式(2.373)可知, 与式(2.375)、式(2.376)右边第一项中的 K_p 有关的项产生的使 r 与 r_d 一致的潜在的力 $f = K_p(r_d - r)$ 可以视为是施加在末端上的。式(2.375)、式(2.376)中手臂末端的当前位置、姿态 r 可根据当前的关节位移 q , 由式(2.364)的正运动学(direct kinematics)计算求得。为了从直观上便于理解, 可以认为式(2.375)、式(2.376)的方法就是要把末端拉向目标值的方向。另外它还有一个特点, 就是不含逆运动学计算。与式(2.370)、式(2.371)一样, 式(2.375)和式(2.376)表明闭环系统的平衡点 r_d 是渐进稳

定的^[2,3]。

3) 姿态的误差表示

在式(2.375)或式(2.376)中,可以用式(2.374)中的雅可比矩阵 $J_s(q)$ 代替式(2.372)中的雅可比矩阵。但此时 s 的姿态分量 ω 无对应的位置量纲来表示(ω 的积分值没有物理意义),故必须留意末端的误差,即姿态分量 $r_d - r$ 的表示方法。现令末端的姿态误差由基准作业坐标系的姿态矩阵 ${}^0R_h \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ 给出,即

$${}^0R_h = [n, o, a] \quad (2.377)$$

式中, $n, o, a \in \mathcal{R}^3$ 表示姿态矩阵中的列向量,它们是基准坐标系表示的末端坐标系中 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单位向量。姿态目标值也可以用姿态矩阵的形式来表示,即

$${}^0R_{hd} = [n_d, o_d, a_d] \quad (2.378)$$

在式(2.375)或式(2.376)中,如果用雅可比矩阵 $J_s(q)$,则 $r_d - r$ 的姿态向量可以用下式给出的 \bar{e}_o 代替 e_o ^[4]:

$$\bar{e}_o = \frac{1}{2} [n \times n_d + o \times o_d + a \times a_d] \quad (2.379)$$

从而得到与式(2.375)对应的式子如下:

$$\tau = J_s(q)^T [K_p [e_p^T, \bar{e}_o^T]^T] - K_v \dot{q} + g(q) \quad (2.380)$$

同样,用式(2.379)所定义的 \bar{e}_o ,式(2.376)可以变形为^[4]

$$\bar{e}_o = k \sin \phi \quad (2.381)$$

式中, k 是从 0R 转向 ${}^0R_{hd}$ 的等效旋转轴方向的单位向量(图 2.62); ϕ 表示绕此轴的旋转角。 \bar{e}_o 即是指向 k 方向的、大小为 $\sin \phi$ 的向量。若用 \bar{e}_o 表示姿态的误差,虽然姿态的误差角 ϕ 超过 $\pi/2$ 后 \bar{e}_o 的模反而会变小,当 $\phi = \pi$ 时变为 0,会产生错误的结果,但是,如果假设姿态误差不太大,如在 $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ 的范围内,那就没有什么问题了。

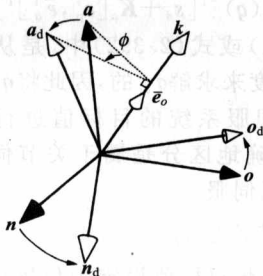


图 2.62 等效旋转轴

若用欧拉角(或横摇角、纵摇角、偏转角)表示姿态,则式(2.373)中 f 对应的姿态分量在直观上就变得难以理解了,而且在表现奇异点方面也会出现问题。用式(2.379)定义的 \bar{e}_o 。虽然在直观上容易理解,在表现奇异点方面也没有问题,但是只有在姿态误差小的条件下才有效。因此,这里最后介绍采用四元数(quaternion)的姿态误差的表示法。四元法作为欧拉参数(Euler parameters)为人们所熟知。设从基准姿态向某一个别的姿态 0R_l 变化的等效旋转轴为 u ,绕该轴的旋转角为 θ ,则四元数 $\hat{q} \in \mathcal{R}^4$ 用下式定义:

$$\begin{aligned} \hat{q} &= [\eta, \boldsymbol{\varepsilon}^T]^T \\ \eta &= \cos \frac{\theta}{2}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = u \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (2.382)$$

在式(2.382)中要注意,等效旋转轴的向量 u 无论是从基准坐标系,还是从用 0R_l 表示的坐标系,它的表达都是相同的,即 ${}^0R_l u = {}^1R_0 u = u$ 。这时,旋转矩阵 0R_l 与四元数 \hat{q} 具有如下式所示的关系:

$${}^0R_l = (2\eta^2 - 1)I + 2(\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}^T + \eta [\boldsymbol{\varepsilon} \times]) \quad (2.383)$$

式中, $[\cdot \times]$ 为与向量的外积等效的变形对称矩阵; I 为 3×3 单位矩阵。式(2.383)也可以反过来应用,即给出四元数,求解与之对应的旋转矩阵^[6]。

本书将与当前手臂末端姿态 0R_h 及其目标姿态 ${}^0R_{hd}$ 所对应的四元数分别定义为 $\hat{q}_h = [\eta_h, \boldsymbol{\varepsilon}_h^T]^T$ 和 $\hat{q}_{hd} = [\eta_{hd}, \boldsymbol{\varepsilon}_{hd}^T]^T$ 。于是,与从末端姿态 0R_h 到目标姿态 ${}^0R_{hd}$ 的等效旋转相对应的四元数 $\Delta \hat{q} = [\delta \eta, \delta \boldsymbol{\varepsilon}]^T$ 可以利用下式求出^[8]:

$$\delta \eta = \eta_h \eta_{hd} + \boldsymbol{\varepsilon}_h^T \boldsymbol{\varepsilon}_{hd} \quad (2.384)$$

$$\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \eta_h \boldsymbol{\varepsilon}_{hd} - \eta_{hd} \boldsymbol{\varepsilon}_h - \boldsymbol{\varepsilon}_h \times \boldsymbol{\varepsilon}_{hd} \quad (2.385)$$

式中,这时的等效旋转轴用 0R_h 或 ${}^0R_{hd}$ 表示的坐标系来描述。因此,若考虑用基准坐标系描述该等效旋转轴向量,设为 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = k \sin \frac{\phi}{2}$ ($= {}^0R_h \delta \boldsymbol{\varepsilon} = {}^0R_{hd} \delta \boldsymbol{\varepsilon}$),则可用下式给出:

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \eta_h \boldsymbol{\varepsilon}_{hd} - \eta_{hd} \boldsymbol{\varepsilon}_h + \boldsymbol{\varepsilon}_h \times \boldsymbol{\varepsilon}_{hd} \quad (2.386)$$

要注意的是, $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 与 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 仅第三项的外积符号不同。这里使用式(2.386)给出的 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 代替前面的 \bar{e}_o ,虽然特性上它们同样是非线性的,但即使姿态的误差角 ϕ 超过 $\pi/2$,仍呈单调增加。

2. 速度控制

在本节 1. 中就关节伺服和作业坐标伺服的有关内容作了说明,手臂的目标值是以位置量纲给出的。但是,有时手臂作业不用末端的位置和姿态来指定,而改成命令它从当前的位置向某一个方向移动,例如手臂末端从当前位置垂直向上运动,或者只绕规定轴旋转变化姿态,这相当于使用操纵杆操纵遥控机械手的情况。对于这种类型的运动指令,虽然也允许用位置量纲的目标值给出,但必须沿着末端目标值运动的方向时时刻刻改变目标值。在关节伺服的场合还必须对每个末端目标值根据式(2.366)进行一次逆运动学计算,以求得关节目标值,显然为此将花费很多计算时间。对于这种运动指令,人们很自然地想到把末端速度作为目标值给出。

末端速度 \dot{r} 或 s 与关节速度 \dot{q} 之间具有如式(2.372)或式(2.374)所示的线性关系。设 \dot{r}_d 或 s_d 为末端速度的目标值。假设手臂无冗余性,也不存在奇异状态,于是 $m=n$,式(2.372)和式(2.374)的雅可比矩阵为正则矩阵,这时实现 \dot{r}_d 或 s_d 的关节速度 $\dot{q}_d = (\dot{q}_{d1}, \dots, \dot{q}_{dn})^T \in \mathcal{R}^n$ 可由下式求出:

$$\dot{q}_d = J(q)^{-1} \dot{r}_d \quad (2.387)$$

或

$$\dot{q}_d = J_s(q)^{-1} \dot{s}_d \quad (2.388)$$

如果手臂具有冗余性,即 $n > m$ 时,或者手臂处于奇异状态下,不存在雅可比矩阵的逆矩阵,那么就无法直接应用式(2.387)或式(2.388)。有冗余性的情况将在本节 6. 中加以讲解。在实际的计算中,与其按式(2.387)或式(2.388)直接求解雅可比矩阵的逆矩阵,还不如把式(2.387)或式(2.388)看作是雅可比矩阵,写出系数矩阵的联立代数方程,然后用消去法去求解 \dot{r}_d ,从计算量的角度来看后者会更有利些。

我们可以把式(2.387)或式(2.388)视为把末端运动分解成必要的关节运动,故称之为分解速度控制(RMRC: Resolved Motion Rate Control)^[7,8]。式(2.387)、式(2.388)的目标值是速度,与其说是这些式子本身在实施控制,倒不如将其视为以速度量纲进行逆运动学计算更妥当。和式(2.366)一样,应该把它们的作用看成是把末端空间的目标值变换为关节空间的目标值。如果在各个关节处

具备独立跟踪目标速度 \dot{q}_{di} 的速度伺服系统,那么只要把式(2.387)或式(2.388)所求得的 \dot{q}_d 的各个元素作为各个关节伺服系统的目标值即可。因此,这种情况可以说是利用关节伺服进行的速度控制。图 2.63 给出了此时控制系统的构成。

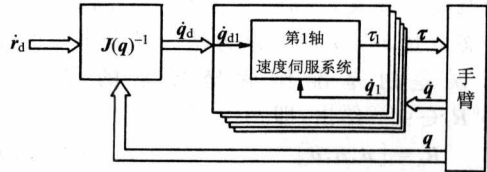


图 2.63 关节伺服的速度控制举例

另外,式(2.387)和式(2.388)中的各个关节伺服系统也适用于本节 1. 中所涉及的把关节位移 q_{di} 作为目标值的情况。设末端速度的目标值用时间函数 $\dot{r}_d(t)$ 给出,而且关关节目标值的初始值为 $r_d(t_0)$,则在时刻 t 的目标值 $r_d(t)$ 为

$$\dot{q}_d(t) = J(q(t))^{-1} \dot{r}_d(t) \quad (2.389)$$

$$q_d(t) = q_d(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{q}_d(\nu) d\nu \quad (2.390)$$

用式(2.389)和式(2.390)计算 $q_d(t)$,相当于式(2.366)的逆运动学计算的数值计算,这个方法对用式(2.366)的无解析解的手臂尤其有效。不过,若反复用式(2.389)、式(2.390)进行计算,存在着与目标位置之间的位置积累误差增大的问题。为了解决这一问题,只要在式(2.389)中加上位置反馈即可,如下式所示:

$$\dot{q}_d = J(q)^{-1} [\dot{r}_d + K_p(r_d - r)] \quad (2.391)$$

对含雅可比矩阵 J_s 的式(2.388)也可以采用同样的办法,不过此时应该将对应于 s 的姿态分量 ω 的末端姿态误差改换成式(2.379)中的 \bar{e}_s ,或者用式(2.386)的 Δe 表示,如下式所示:

$$\dot{q}_d = J_s(q)^{-1} [s_d + K_p[e_p^T, \bar{e}_s^T]^T] \quad (2.392)$$

在式(2.391)或式(2.392)中,是从末端误差 $r_d - r$ 的角度来求解 \dot{q}_d 的,因此将 \dot{q}_d 作为各个关节速度伺服系统的目标值进行控制的方法,无法明确地区分是属于关节伺服还是属于作业坐标伺服。

3. 加速度控制

前面就将目标值设定为位置或速度的场合的手臂伺服系统的构成作了介绍。但是在

关节伺服的情况下,即使给出正确的目标值 q_d, \dot{q}_d , 实际的响应情况仍然被各个关节伺服系统的性能所左右。通常的做法是在保证稳定的情况下调大增益,减小与目标值的偏差,然而手臂的运动速度越快、加速度越大,则离心力、哥氏力、惯性力和关节轴间耦合的影响也就越大,误差也越严重。即使保证作业坐标伺服的式(2.375)和式(2.376)具有目标值的渐进稳定性,也无法保证过渡特性的好坏,而且随着手臂姿态的不同,响应特性还可能发生变化。这些问题之所以产生,是因为在迄今所考虑的控制策略中,并未涉及手臂动态特性的式(2.365)所致。因此,在本小节中所叙述的方法是将目标值再追加加速度,即考虑手臂的动态特性,以显式的形式给出过渡特性的要求。

首先,设目标值为 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$, 即包括关节变量加速度,这时考虑采用如下的控制方法:

$$\tau = M(q) [\ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)] + h(q, \dot{q}) + \Gamma \dot{q} + g(q) \quad (2.393)$$

这是关节伺服加速度控制,图 2.64 表示伺服系统的结构。在式(2.393)中, $M(q)$ 、 $h(q, \dot{q})$ 、 Γ 、 $g(q)$ 均和式(2.365)中的意义相同,式(2.393)相当于进行逆动力学(inverse dynamics)计算,以求出能实现由 $\ddot{q}_{adj} = \ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q)$ 所给出的关节加速度的关节驱动力。为简便起见,先假设 $M(q)$ 、 $h(q, \dot{q})$ 等的值可以正确计算。把式(2.393)代入式(2.365)的左边整理后,得

$$M(q) [\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e] = 0 \quad (2.394)$$

式中, $e = q_d - q$ 。因为 $M(q)$ 是正定对称矩阵,故两边乘上 $M(q)^{-1}$ 后得到

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (2.395)$$

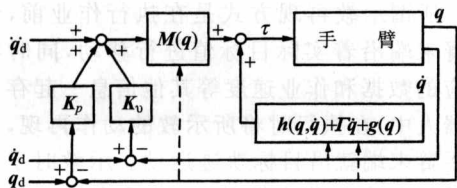


图 2.64 用关节伺服的加速度控制

适当选择位置增益 K_p 、速度增益 K_v , 可以使 e 渐进收敛于 0, 使 q 与 q_d 达到一致。瞬态响应特性可由 K_p 、 K_v 来确定。例如, 设

$K_v = k_v I$ 、 $K_p = k_p I$ (I 是 $n \times n$ 的单位矩阵), 若 $k_v = 2\zeta\omega_n$ 、 $k_p = \omega_n^2$, 则式(2.395)的响应是角频率为 ω_n 、阻尼系数为 ζ 的二阶系统响应。控制手臂运动时, 一般不希望出现超调量, 所以通常取 $\zeta = 1$ 。这样在加速度控制中之所以瞬态特性也能被满足, 是因为通过离心力、哥氏力、重力等的补偿, 使非线性手臂的动态特性被线性化, 同时考虑了惯性项使系统解耦的结果。因此, 可以将式(2.393)的加速度控制视为本节 4. 中打算加以说明的动态控制(dynamic control)的一种方式。

式(2.393)所示的加速度控制由于能够给定瞬态特性, 所以这种控制策略非常有效, 不过也应该指出它的问题是计算量非常大。为了缩短采样时间, 可将式(2.393)的部分计算省略, 采用下面简化的公式^[9]:

$$\tau = \tilde{M} [\ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) + K_i \int (q_d - q) dt] \quad (2.396)$$

式(2.396)中省略了 $h(q, \dot{q})$ 、 $\Gamma \dot{q}$ 、 $g(q)$ 的计算, $\tilde{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 被 $M(q)$ 取代, 简化为仅由对角元素构成的常数矩阵。 \tilde{M} 的对角元素最好选择 $M(q)$ 的对角元素的代表值。此外, 为了消除稳态误差, 在式(2.396)中重新补上了积分项。各种工业机器人减速比的数值比较大, 故驱动器惯性的影响也会比较大, 所以 $M(q)$ 的对角元素比非对角元素大得多, 而轴间耦合的影响相对变小。因而在很多情况下, 采用式(2.396)的近似控制策略能够满足计算的要求。

下面讨论目标值为 $r_d, \dot{r}_d, \ddot{r}_d$ 的情况, 此时目标值包括了末端位置、姿态的加速度。为此, 首先应该求出末端加速度和关节加速度之间的关系。将式(2.372)的两边对时间进行微分, 即可得

$$\ddot{r} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (2.397)$$

式中, $\dot{J}(q)$ 表示 $d[J(q)]/dt$ 。

现在, 为了跟踪目标轨迹 r_d , 把根据 \ddot{r}_d 所修正的末端加速度 \ddot{r}_{adj} 以下式给出:

$$\ddot{r}_{adj} = \ddot{r}_d + K_v(\dot{r}_d - \dot{r}) + K_p(r_d - r) \quad (2.398)$$

式中, K_v 、 K_p 是适当的增益矩阵; \dot{r} 是当前的末端速度, 它由传感器测得的关节速度 \dot{q} 用式(2.372)求得。从式(2.397)可以求得实现给定的末端加速度 \ddot{r}_{adj} 的关节加速度为

$$\ddot{q}_{adj} = J(q)^{-1} [\ddot{r}_{adj} - \dot{J}(q)\dot{q}] \quad (2.399)$$

Point control) 和连续路径控制 (CP control: Continuous Path control) 两种 (图 2.66)。

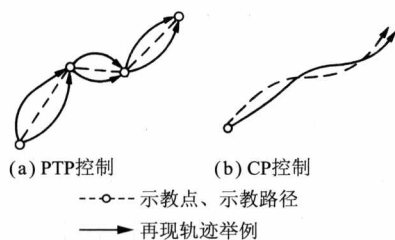


图 2.66 PTP 控制和 CP 控制

(1) PTP 控制 例如,点焊等作业,人们关注在示教点对末端的位置和姿态定位的问题。至于向该点运动的路径和速度等则不是主要的问题。这种不考虑路径,而是一个接一个地在示教点处反复进行定位的控制就是 PTP 控制。

(2) CP 控制 例如,弧焊、喷漆等作业,必须控制机器人以示教的速度沿着示教的路径进行运动。这样的控制称为 CP 控制。按示教的方法不同 CP 控制又分为两种:其一是示教时让机器人沿着实际的路径运动,并每隔一个微小的间距就大量记忆该路径上的位置,再现时把所记忆的点一个接一个地作为伺服系统的目标值给出,以达到路径跟踪的目的;另一个是和 PTP 控制一样,示教时只记忆路径上的主要点,再现时则在这些主要点之间用直线或圆弧来插补,计算出每个微小间距的路径上的点,再把它们输出给伺服系统 (图 2.67)。后者和前者相比,需要记忆的点数较少,路径修正也比较容易,因而系统具有灵活性,但必须对其进行插补修正。

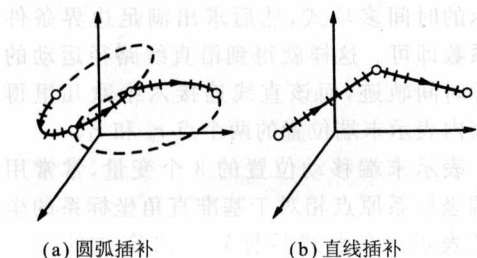


图 2.67 带插补的 CP 控制

所谓数值控制方式,它和数控机床一样,是把目标轨迹以数值、数据的形式给出。所谓数据,是把作业对象的 CAD 数据、在实施控制中所得到的来自传感器的测量数据等各

种数据经过变换后给出的。可见,数值控制方式比单纯的再现示教轨迹的示教再现方式更具有一般性、通用性、灵活性。然而,把目标值以数值的形式给出可能会导致计算时间过长,出现机器人装配误差、每台设备本身的分散误差带来新的问题等麻烦。

2) 目标轨迹生成

在 PTP 控制和 CP 控制中,轨迹是由示教直接给出的,而在数值控制方式中,目标轨迹,即输出给伺服系统的目标值的时间函数必须以数值的形式给出。随着机器人手臂面临的作业不同,作业空间内的末端轨迹不一定非要从起点至终点在整个区间内都要预先给定,有时仅仅给定起点和终点,有时仅仅给定起点、终点及路径所经过的若干中间点即可。在这种情况下,必须人为设定未给定区间内适当的轨迹。下面我们就来研究,当手臂末端由某个位置 (包括姿态,下同) r_0 历经某一时间 t_i 移向另一个位置 r_i 时,如何确定 r_0 和 r_i 之间轨迹的问题。实际上,这个问题也适用于 CP 控制中的插补。

在求目标轨迹时应该注意的是,为了生成实际可行的光滑轨迹,至少应保证位置和速度的连续性条件。另外,为了不使末端产生不必要的振动,还希望能够保证加速度的连续性条件。关于目标轨迹生成的方法,目前已有许多种方案^[11],本节只介绍利用时间多项式给定轨迹的方法^[12,13]。这个方法进一步可分为用关节变量描述轨迹和用末端位置变量描述轨迹两种,它们分别对应于关节伺服和作业坐标伺服。

首先就关节变量的方法加以讨论。设对应于 r_0 和 r_i 的关节变量 q_0 和 q_i 已经给出。若只给出 r_0 、 r_i ,则可以求解逆运动学方程,预先求出 q_0 、 q_i 。任意选一个关节变量 q_i 记作 ξ ,令初始时刻 0 的值为 ξ_0 ,终点时刻 t_i 的值为 ξ_i ,即

$$\xi(0) = \xi_0, \quad \xi(t_i) = \xi_i \quad (2.405)$$

再将另外两个时刻的 ξ 的速度和加速度作为边界条件以下式表示:

$$\dot{\xi}(0) = \dot{\xi}_0, \quad \dot{\xi}(t_i) = \dot{\xi}_i \quad (2.406)$$

$$\ddot{\xi}(0) = \ddot{\xi}_0, \quad \ddot{\xi}(t_i) = \ddot{\xi}_i \quad (2.407)$$

虽然满足这些条件的光滑的函数很多,但考虑到简化计算和形式简单,本节选择时间 t 的多项式。能满足任意给出的式 (2.405) ~ 式

(2.407)的边界条件的多项式,其最低次数是应该为5,所以设

$$\xi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (2.408)$$

经过计算,满足式(2.405)~式(2.407)的待定系统 $a_0 \sim a_5$ 结果如下:

$$a_0 = \xi_0 \quad (2.409)$$

$$a_1 = \dot{\xi}_0 \quad (2.410)$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \ddot{\xi}_0 \quad (2.411)$$

$$a_3 = \frac{1}{2t_f^3} [20\xi_f - 20\xi_0 - (8\dot{\xi}_f + 12\dot{\xi}_0)t_f - (3\ddot{\xi}_0 - \ddot{\xi}_f)t_f^2] \quad (2.412)$$

$$a_4 = \frac{1}{2t_f^4} [30\xi_0 - 30\xi_f + (14\dot{\xi}_f + 16\dot{\xi}_0)t_f + (3\ddot{\xi}_0 - 2\ddot{\xi}_f)t_f^2] \quad (2.413)$$

$$a_5 = \frac{1}{2t_f^5} [12\xi_f - 12\xi_0 - (6\dot{\xi}_f + 6\dot{\xi}_0)t_f - (\ddot{\xi}_f - \ddot{\xi}_0)t_f^2] \quad (2.414)$$

特殊是,若 $\ddot{\xi}_0 = \ddot{\xi}_f = 0$ 、 ξ_0 、 ξ_f 、 $\dot{\xi}_0$ 、 $\dot{\xi}_f$ 满足如图 2.68 所示的关系,即

$$\xi_f - \xi_0 = \frac{t_f}{2} (\dot{\xi}_0 + \dot{\xi}_f) \quad (2.415)$$

时, $a_5 = 0$, 于是 $\xi(t)$ 为 4 次多项式。

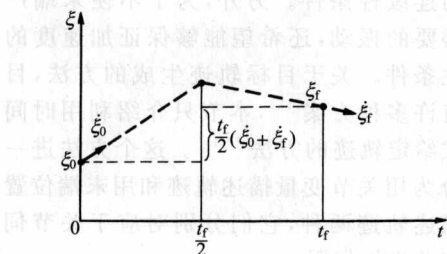


图 2.68 起点时刻和终点时刻的边界条件

若把这个 4 次多项式和直线插补结合起来应用,就可以比较容易地给出各种轨迹。例如,下面讨论一个情况,即从起点 ξ_0 的静止状态开始,经加速、等速、减速,最后到点 ξ_f 停止。如图 2.69 所示,先适当选择决定加减速时间的参数 Δ ,然后确定中间的辅助点 ξ_{02} 、 ξ_{f1} 。在这里是这样确定的,首先把 ξ_{01} 、 ξ_{f2} 取为 $\xi_{01} = \xi_0$ 、 $\xi_{f2} = \xi_f$,然后让 ξ_{02} 和 ξ_{f1} 处于 ξ_{01} 和 ξ_{f2} 相连的直线上。接着用折线 $\{\xi_0, \xi_{01}, \xi_{f2}, \xi_f\}$ 把 ξ_0 、 ξ_{02} 之间和 ξ_{f1} 、 ξ_f 之间的各个端点连接起来,并用 4 次多项式的关系使其加速度为 0。再将 ξ_{02} 、 ξ_{f1} 之间以直线相连接。于是 $0 \leq t \leq 2\Delta$

为加速区间; $2\Delta \leq t \leq t_f - 2\Delta$ 为等速区间; $t_f - 2\Delta \leq t \leq t_f$ 为减速区间。

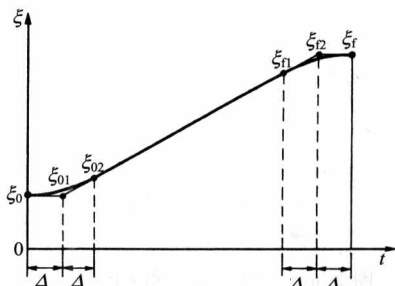


图 2.69 从起点到终点的轨迹

再讨论用多项式连接 ξ_0 和 ξ_f 的情况。若只考虑位置、速度的边界条件(式(2.405)、式(2.406)),而不考虑表示加速度连续性的式(2.407),那么目标轨迹可以不用式(2.408)给出,而用 t 的 3 次多项式给出,特别当 ξ_0 、 ξ_f 、 $\dot{\xi}_0$ 、 $\dot{\xi}_f$ 满足式(2.415)时, $\xi(t)$ 变成 2 次多项式。即有时 3 次多项式和 2 次多项式也可以代替上述的 4 次多项式。

上面介绍了关节变量的方法。不过若用这种方法确定 r_0 和 r_f 之间的轨迹,就可能难以预测末端将沿着什么样的轨迹进行运动。另外,有些场合要求给定末端轨迹本身,例如作业希望末端沿直线移动。在这种情况下,就可以选择由末端位置变量来确定 r_0 和 r_f 之间轨迹的方法。有许多种方法可以用来描述末端移动位置和姿态的 6 个变量,一旦选定某种方法,确定了一组变量后,剩下的就完全可以与关节变量同样的处理方法来确定各个变量的目标时间轨迹。即在 6 个变量中任选一个,令其为 ξ ,并假定一个如式(2.408)所示的时间多项式,然后求出满足边界条件的系数即可。这样就得到沿直线路径运动的目标时间轨迹,而该直线连接六维欧几里得空间内表示末端位置的两个点 r_0 和 r_f 。

表示末端移动位置的 3 个变量,常常用末端坐标系原点相对于基准直角坐标系的坐标来表示。在上述目标轨迹决定法的例子中,末端坐标系的原点位置做直线运动。关于末端的姿态,若取描述姿态的三个变量为欧拉角或横摇角、纵摇角、偏转角,则直线运动也与这些变量有关。既然末端姿态的运动是在基准直角坐标系内所表示的,却要由围绕 3 个斜交的轴旋转来合成,这样显然造成

了直观上理解的困难。为了改进这个问题,可以将对应于 r_0 的末端坐标系姿态矩阵设为 O_0 ,将对应于 r_f 的末端坐标系的姿态矩阵设为 O_f ,于是能求出从 O_0 转向 O_f 的等效旋转轴 k_f 和转角 ϕ_f ,若用式(2.408)来描述姿态目标轨迹绕 k_f 轴由0旋转至 ϕ_f 的目标轨迹,那么从基准坐标系来观察该轨迹,就得到一条围绕唯一的、方向固定的旋转轴 k_f 旋转的轨迹,这样从直观上就变得容易理解了。

3) 动态控制

在示教再现方式中,目标轨迹通常是以各个关节变量的形式来记录的,因而手臂的控制依赖由每个关节伺服回路组成的关节伺服就足够了,其构成也很简单。但在这种情况下,离心力、哥氏力、重力等引起的各个关节之间的耦合是作为外部干扰来处理的,往往无法满足高速、高精度控制的要求。如在本节2.中所述,当目标轨迹以时间函数 $q_d(t)$ 或 $r_d(t)$ 给出时,速度 $\dot{q}_d(t)$ 、 $\dot{r}_d(t)$ 和加速度 $\ddot{q}_d(t)$ 、 $\ddot{r}_d(t)$ 也可以通过解析法求得。在这种场合采用涉及手臂动态特性的高级控制策略更为可取。

所谓的动态控制法(dynamic control)或计算转矩法(computed torque method)就是一种考虑机器人手臂动态特性,并能实现给定目标轨迹的控制方法^[12,14,15]。下面将介绍它的两级控制方式,即针对非线性系统的线性补偿和针对线性系统的伺服补偿方法。设机械手的运动方程式表示为

$$\tau = M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + \Gamma\dot{q} + G(q) \quad (2.416)$$

要注意的是,现在可以把 $[q^T, \dot{q}^T]^T$ 作为这个系统的状态变量,将 u_r 作为新的输入,并按下述关系进行非线性状态的反馈补偿:

$$\tau = \hat{h}(q, \dot{q}) + M(q)u_r \quad (2.417)$$

式中,

$$\hat{h}(q, \dot{q}) = h(q, \dot{q}) + \Gamma\dot{q} + G(q) \quad (2.418)$$

于是可得

$$\ddot{q} = u_r \quad (2.419)$$

这是一个对于关节变量来说的线性解耦系统。也就是说,式(2.417)完成了线性补偿。如果式(2.417)中不含有建模误差,而且在系统中未混入外部干扰,假设将目标加速度 $\ddot{q}_d(t)$ 以 u_r 给出,则它能完全实现 $q(t) = q_d(t)$ 的目标轨迹。但是,由于建模误差和外

部干扰是无法避免的,所以一个基本的方法就是通过设置对式(2.419)线性系统的伺服补偿器来减少上述因素的影响。图2.70所示即为该系统的方框图。

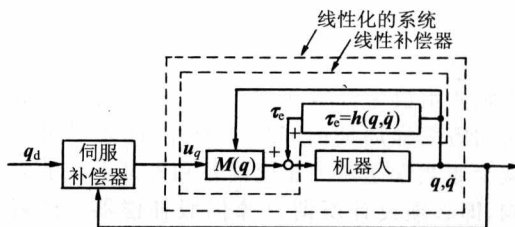


图 2.70 关节变量线性化和伺服补偿的两级控制

例如,考虑设置如下式所示的补偿值:

$$u_q = \ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) \quad (2.420)$$

若将误差 e 定义为

$$e = q_d - q \quad (2.421)$$

由式(2.419)和式(2.420)可得

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = 0 \quad (2.422)$$

若取 K_v 、 K_p 为对角元素是正值的对角矩阵,即对每个关节设置了PD动作反馈回路,则 e 的各个元素均收敛于0。那么,即使有建模误差和外部干扰,也能够某种程度上减少其影响。

以上是基于有关关节变量的线性化的方法。但是,有些场合并非要求关节变量,而是希望针对机械手作业直接相关的变量,如末端位置、姿态等加以解耦和伺服补偿。所以,下面讨论对 n 维输出变量 r 线性化的方法,此时 r 由下式给出:

$$r = R(q) \quad (2.423)$$

若对式(2.423)进行微分,可得

$$\dot{r} = J(q)\dot{q} \quad (2.424)$$

式中, $J(q)$ 是以 $J(q) = \partial R / \partial q^T$ 给出的雅可比矩阵。假设在 q 的适当范围内雅可比矩阵 $J(q)$ 是正则矩阵,若将 u_r 作为新的输入,并按下式关系进行非线性状态反馈补偿:

$$\tau = \hat{h}(q, \dot{q}) + M(q)J^{-1}(q)[-J(q)\dot{q} + u_r] \quad (2.425)$$

则得到

$$\ddot{r} = u_r \quad (2.426)$$

即得到对输出 r 的线性解耦系统,于是和式(2.419)的情况一样,若对线性系统式(2.426)设置适当的伺服补偿器,则可以得到如图2.71所示的控制系统。这样的伺服补

偿器有很多种设计方法,如选用下式:

$$\mathbf{u}_r = \ddot{\mathbf{r}}_d + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{r}}_d - \dot{\mathbf{r}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{r}_d - \mathbf{r}) \quad (2.427)$$

则当 $\mathbf{e} = \mathbf{r}_d - \mathbf{r}$ 时,就与式(2.422)相同。值得指出的是,它的控制原则与在本节3.中所述的分解加速度控制的形式相同。选用这种两级控制方式时必须考虑的因素是,由于式(2.417)或式(2.425)的计算非常复杂,所以必须使用数字计算机进行,因而就产生了如何缩短采样周期的问题。另外,还要尽可能减少原数学建模的建模误差和外部干扰的影响,即必须设计所谓鲁棒伺服补偿器。前者可以考虑选择牛顿-欧拉计算公式的逆运动学问题算法^[16]来解决。后者就要参考用2个自由度伺服系统的研究方法^[17,18]或灵敏度函数、互补灵敏度函数的研究方法^[19]来解决。

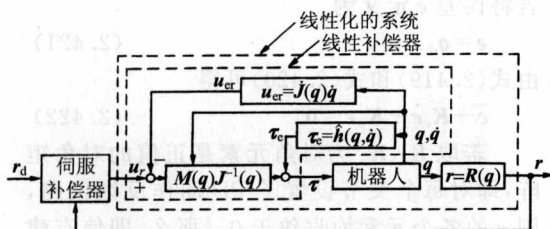


图 2.71 输出的线性化和伺服补偿的两级控制

5. 解耦控制

在本小节中,将介绍非线性系统的解耦控制理论,并把它用于机械手,然后介绍同时进行动态特性线性化、输出变量间的解耦和任意极点配置的方法^[20]。这个理论给出了在本节4.中所介绍的两级控制中线性补偿的理论根据,所以是很有意义的。

现在我们来研究 n 输入、 n 输出的非线性时变系统,该系统如下式所示:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{a}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t) \quad (2.428)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{c}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{D}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t) \quad (2.429)$$

式中, \mathbf{x} 为 n_x 维状态向量; \mathbf{y} 为 n_y 维输出向量; \mathbf{u} 为 n_u 维输入向量。另外, $\mathbf{a}(\mathbf{x}, t)$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ 、 $\mathbf{c}(\mathbf{x}, t)$ 、 $\mathbf{D}(\mathbf{x}, t)$ 是已知向量或矩阵。在该系统中,通过实施如下所示的适当的非线性时变状态反馈控制律:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{e}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, t)\bar{\mathbf{u}}(t) \quad (2.430)$$

输出 \mathbf{y} 的各个元素不但可以相互解耦,而且具有任意指定的极点。式(2.430)中 $\bar{\mathbf{u}}(t)$ 为新的 n 维输入向量。

假设 $\mathbf{D}(\mathbf{x}, t)$ 的第 i 行向量为 $\mathbf{d}_i(\mathbf{x}, t)$,

$\mathbf{c}(\mathbf{x}, t)$ 和 \mathbf{y} 的第 i 个元素为 $c_i(\mathbf{x}, t)$ 和 y_i , 另外,设 y_i 对于时间的 j 阶导函数为 $y_i^{(j)}$ 。这时,若反复就时间对 y_i 进行微分,并用式(2.428)和式(2.429)整理,直至 \mathbf{u} 的系数不为 0 为止,则对适当的正整数 ν_i , 可得如下关系:

$$y_i^{(j)} = c_i^{[j]}(\mathbf{x}, t) \quad (j=0, 1, \dots, \nu_i-1) \quad (2.431)$$

$$y_i^{(\nu_i)} = c_i^{[\nu_i]}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{d}_i^{[\nu_i]}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} \quad (2.432)$$

式中, $y_i^{(0)} = y_i$, $c_i^{[0]}(\mathbf{x}, t) = c_i(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{d}_i^{[0]}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{d}_i(\mathbf{x}, t)$

$$c_i^{[j]}(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial}{\partial t} y_i^{(j-1)} + \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}^T} y_i^{(j-1)} \right] \mathbf{a}(\mathbf{x}, t) \quad (2.433)$$

$$\mathbf{d}_i^{[j]}(\mathbf{x}, t) = \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}^T} y_i^{(j-1)} \right] \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \quad (2.434)$$

另外, $\nu_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是直至 \mathbf{u} 开始出现为止的微分次数,并假定在被研究对象系统中,无论 \mathbf{x}, t 的值如何, ν_i 都是一定的。再设

$$\mathbf{c}^*(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} c_1^{[\nu_1]}(\mathbf{x}, t) \\ c_2^{[\nu_2]}(\mathbf{x}, t) \\ \vdots \\ c_n^{[\nu_n]}(\mathbf{x}, t) \end{bmatrix} \quad (2.435)$$

$$\mathbf{D}^*(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_1^{[\nu_1]}(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{d}_2^{[\nu_2]}(\mathbf{x}, t) \\ \vdots \\ \mathbf{d}_n^{[\nu_n]}(\mathbf{x}, t) \end{bmatrix} \quad (2.436)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}^*(\mathbf{x}, t) &= \left[\sum_{k=0}^{\nu_i-1} \alpha_{ik} c_i^{(k)}(\mathbf{x}, t) \right] \\ &= \text{col} \left[\sum_{k=0}^{\nu_i-1} \alpha_{ik} y_i^{(k)} \right] \end{aligned} \quad (2.437)$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \quad (2.438)$$

式中, $\text{col}[\cdot]$ 为列向量; $\text{diag}[\cdot]$ 为对角矩阵; α_{ik}, λ_i 为任意常数。这时假如 $\mathbf{D}^*(\mathbf{x}, t)$ 是正则矩阵,在式(2.430)中若规定

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}, t) = -\mathbf{D}^{*-1}(\mathbf{x}, t) [\mathbf{c}^*(\mathbf{x}, t) + \boldsymbol{\alpha}^*(\mathbf{x}, t)] \quad (2.439)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{D}^{*-1}(\mathbf{x}, t) \boldsymbol{\Lambda} \quad (2.440)$$

则系统对于输出 \mathbf{y} 就是一个解耦系统。实际上,如果在式(2.428)和式(2.429)中使用式(2.430)、式(2.439)和式(2.440),即可得到下式:

$$y_i^{(\nu_i)} + \alpha_{i(\nu_i-1)} y_i^{(\nu_i-1)} + \dots + \alpha_{i0} y_i = \lambda_i \bar{u}_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.441)$$

在此,适当地选择 α_{ik}, λ_i , 就可在解耦后的各

个单输入、单输出系统中给出任意的极点配置和增益。

下面我们将上述理论应用于机械手。将手臂运动方程式(2.416)表示为

$$M(q)\ddot{q} + \hat{h}(q, \dot{q}) = \tau \quad (2.442)$$

式中, $\hat{h}(q, \dot{q})$ 为式(2.418)所给出的函数。另外, 如果将任意的 n 维作业向量 r 作为输出, 它满足下列关系:

$$y = r = R(q) \quad (2.443)$$

$$\dot{y} = \dot{r} = J(q)\dot{q} \quad (2.444)$$

再有, 若把驱动力 τ 看成是输入, 在这种情况下, 取 $[q^T, \dot{q}^T]^T$ 作为状态向量, 则式(2.442)变成如下形式:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -M^{-1}(q)\hat{h}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(q) \end{bmatrix} \tau \quad (2.445)$$

对于式(2.443)、式(2.445), $v_i = \lambda$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 则有

$$D^* = J(q)M^{-1}(q) \quad (2.446)$$

我们把 $\text{rank} J < n$ 的手臂姿态(用 q 表示的整个手臂的位置、姿态)称为奇异姿态(奇异点), 对于除奇异姿态以外的手臂任意姿态, 式(2.446)中的 D^* 为正则矩阵, 并且能够实现解耦。根据式(2.430)、式(2.439)和式(2.440), 若设 $J_i(q)$ 为 $J(q)$ 的第 i 行向量, 则可以求得如下式所示的状态反馈律:

$$\tau = \hat{h}(q, \dot{q}) + M(q)J^{-1}(q)\text{col}[-J_i(q)\dot{q} - \alpha_{i1}\dot{y}_i - \alpha_{i0}y_i + \lambda_i\bar{u}_i] \quad (2.447)$$

根据式(2.447)可以求得如下式所示的具有线性二阶系统特性的解耦系统:

$$\ddot{y}_i + \alpha_{i1}\dot{y}_i + \alpha_{i0}y_i = \lambda_i\bar{u}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.448)$$

式中, α_{i1} 、 α_{i0} 、 λ_i 为可由设计者确定的常数。此外, 上面表示解耦控制反馈律的式(2.447), 在补偿表示离心力、哥氏力、重力等的 $\hat{h}(q, \dot{q})$ 这一点上, 与动态控制的作用是相同的, 进而可以认为在图 2.71 中具有如下式所示的伺服控制器:

$$u_y = \text{col}[-\alpha_{i1}\dot{y}_i - \alpha_{i0}y_i + \lambda_i\bar{u}_i] \quad (2.449)$$

此外, 在不能忽视驱动器动态特性的情况下, 也能够应用解耦控制理论。例如, 在考虑直流伺服电机自感的情况下, 可得到具有三阶系统特性的解耦系统^[21], 而非如式(2.448)所示的二阶系统。

6. 冗余手臂的控制

人类的手臂具有 7 个自由度, 如果仅仅是用手抓住物体并使其固定, 那么 6 个自由度就足够了, 因而有 1 个冗余自由度。但正是由于有了这种冗余性(redundancy), 才增加了手臂的柔顺性和通用性。机器人手臂也同样, 当它的自由度大于作业所需要的自由度时, 手臂具有冗余性。例如, 如图 2.72 所示, 若用平面运动的 3 个自由度手臂, 使其末端位置与某目标值重合时, 作为手臂整体可以取无限多的状态。这是因为存在 1 个冗余自由度所致。积极地利用这一点, 可以实现许多功能, 例如一面使手臂末端跟踪目标位置, 一面使其又不与障碍物相碰; 使末端能伸到狭小的孔穴深处; 使各个关节的驱动速度与加速度尽量一致; 使手臂保持便于操作末端执行器的姿态等。

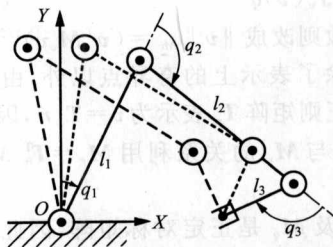


图 2.72 在平面上运动的 3 个自由度的机器人

人们针对冗余机器人手臂的控制规律提出了许多方案^[22~25], 举例来说它们有基于以速度级、加速度级、转矩级的公式化的方法, 另外还有局部优化方法(分别对每个瞬时求出该时刻的最优解)和全局优化的方法^[26](涉及整个控制空间优化)。以下我们来说明基于速度级的瞬态优化法。该方法首先用雅可比矩阵描述手臂的关节速度与末端速度之间的关系, 再用雅可比矩阵的伪逆矩阵(pseudo inverse matrix)以线性联立代数方程组的任意解的形式来表现手臂的冗余性。然后, 根据冗余性的应用目的来决定该任意参数向量。

假设用 $r = R(q)$ 来描述所给出的冗余手臂的 n 维关节变量 q 与 m ($m \leq n$) 维末端变量 r 之间的关系。若将它进行时间微分, 则得到

$$\dot{r} = J(q)\dot{q} \quad (2.450)$$

式中, $J(q)$ 为雅可比矩阵。在给出末端速度 \dot{r}

后,我们来求满足式(2.450)的关节速度 \dot{q} 的通解。首先做一些准备工作。为了使求出的解不受广义坐标 q 及 r 的取法或表示 \dot{r} 及 \dot{q} 的单位的形式的影 响,选择 $\|\dot{r}\|_{M_r} = (\dot{r}^T M_r \dot{r})^{1/2}$,以及 $\|\dot{q}\|_{M_q} = (\dot{q}^T M_q \dot{q})^{1/2}$,作为评价 \dot{r} 及 \dot{q} 大小的范数。式中, M_r 及 M_q 为任意选择的正定对称矩阵。

当末端能够在三维空间中采取任意姿态时,为了表示姿态,一般采用欧拉角等三个角度的变量组。但是,在这种情况下,手臂机构尽管能够绕任意轴旋转,但式(2.450)中的雅可比矩阵 J 不是全秩矩阵,可能会存在无法描述旋转姿态的情况。人们将这种情况称为描述上的奇异点^[27]。避免出现该问题的一个方法是,改用向量 v 表示末端速度,该向量用角速度向量代替 \dot{r} 中的旋转速度分量,这时,式(2.450)可以改写成

$$v = J_r(v)\dot{q} \quad (2.451)$$

作为范数则改成 $\|v\|_{M_v} = (v^T M_v v)^{1/2}$, v 与 \dot{r} 的关系除了表示上的奇异点以外,由于利用适当的正则矩阵 T_v 表示为 $v = T_v \dot{r}$,因此系数矩阵 M_v 与 M_r 的关系利用 $M_r = T_v^T M_v T_v$ 就能给出。

M_r 及 M_q 是正定对称矩阵,因此存在满足 $M_r = T_r^T T_r$ 及 $M_q = T_q^T T_q$ 的正则矩阵 T_r 及 T_q 。利用这些关系式和下式将 \dot{r} 及 \dot{q} 进行归一化(无量纲)处理:

$$\hat{\dot{r}} = T_r \dot{r}, \hat{\dot{q}} = T_q \dot{q} \quad (2.452)$$

则式(2.450)变成

$$\hat{\dot{r}} = \hat{J} \hat{\dot{q}}, \quad \hat{J} = T_r J T_q^{-1} \quad (2.453)$$

$\hat{\dot{r}}$ 和 $\hat{\dot{q}}$ 满足 $\|\hat{\dot{r}}\| = (\hat{\dot{r}}^T \hat{\dot{r}})^{1/2} = \|\dot{r}\|_{M_r}$ 及 $\|\hat{\dot{q}}\| = \|\dot{q}\|_{M_q}$ 。因而,利用 \hat{J} 的伪逆矩阵 \hat{J}^+ ,式(2.453)的通解可由下式给出:

$$\hat{\dot{q}} = \hat{J}^+ \hat{\dot{r}} + (I_n - \hat{J}^+ \hat{J}) \hat{k}(t) \quad (2.454)$$

式中, I_n 为 n 阶单元矩阵; $\hat{k}(t)$ 为任意的 n 维向量,表示手臂的冗余性。另外,将式(2.454)改用原来的 \dot{q} 及 \dot{r} ,可表示为

$$\dot{q} = J^+ \dot{r} + (I_n - J^+ J) k(t) \quad (2.455)$$

式中,

$$J^+ = T_q^{-1} \hat{J}^+ T_r = T_q^{-1} (T_r J T_q^{-1})^+ T_r \quad (2.456)$$

$k(t) = T_q^{-1} \hat{k}(t)$ 。在 J 为全秩(rank $J = m$)时,

式(2.456)中的 J^+ 可简化为

$$J^+ = M_q^{-1} J^T (J M_q^{-1} J^T)^{-1} \quad (2.457)$$

式(2.454)或式(2.455)是利用冗余性的基本式。要注意的是,它们是在冗余自由度条件下分解速度控制方式的一般形式。

现举例说明这些基本式子的应用。在图2.72中,假设时刻 $t=0$,手臂处于实线位置 q_0 处,在不改变末端位置(即 $\dot{r}=0$ 保持不变)的条件下,想要改变手臂姿态时,只要将从下式求得的 \dot{q} 作为各个关节的目标值即可:

$$\dot{q} = (I_n - J^+ J) k(t) \quad (2.458)$$

在式(2.458)中,适当选择 $k(t)$,就能够使手臂运动至图2.72中的虚线或短划线的位形。

再举一个例子,说明既让末端跟踪目标轨迹 $r_d(t)$,又借助于冗余性回避奇异点的具体应用^[28]。例如,在图2.72中,当手臂的 q_2 和 q_3 取 0° 或 180° 时,无法使末端执行器沿连接第2关节与第3关节的直线方向移动。这样的位形是手臂奇异姿态。有一个指标可以表示接近手臂奇异位形的程度,叫做可操作度^[29]。这是利用 $\hat{J}(q)$ 由下式表示的非负函数:

$$w = (\det \hat{J}(q) \hat{J}^T(q))^{1/2} \quad (2.459)$$

它的数量与以范数 $\|\hat{r}\|$ 计算的体积成正比,而范数 $\|\hat{r}\|$ 则是在关节速度 $\|\hat{\dot{q}}\| \leq 1$ 的范围内全部能够实现的末端速度 $\hat{\dot{r}}$ 所构成的集合(称为可操作性椭圆体)。 w 也表示为 $w = |\det T_r| [\det J(q) M_q^{-1} J^T(q)]^{1/2}$ 。可操作度 w 的值在奇异点为0,在手臂的其他姿态下为正。所以,若利用手臂的冗余性进行控制,尽可能保持较大的 w 值,就有利于回避奇异点。因此,在式(2.455)中,设 $\hat{\dot{r}} = \hat{\dot{r}}_d$,取 $k(t)$ 为:

$$k(t) = M_q^{-1} \xi(t) k_p, \quad \xi(t) = \frac{\partial w}{\partial q} \quad (2.460)$$

式中, k_p 为适当的正常数。于是可操作度的变化速度 \dot{w} 由下式给出:

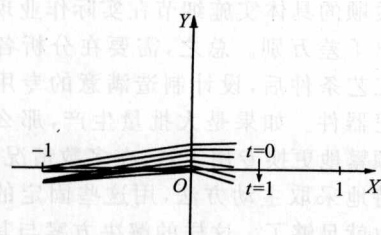
$$\begin{aligned} \dot{w} &= \left(\frac{\partial w}{\partial q} \right)^T \dot{q} \\ &= \xi^T J^+ (q) \dot{r}_d + \xi^T (I_n - J^+ J) M_q^{-1} \xi k_p \end{aligned} \quad (2.461)$$

进一步,利用式(2.456),则式(2.461)右边第二项成为

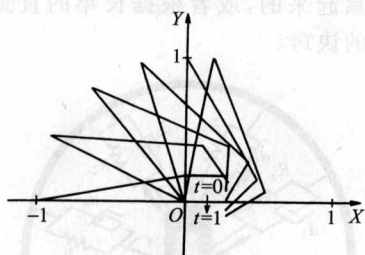
$$\begin{aligned} &\xi^T (I_n - J^+ J) M_q^{-1} \xi k_p \\ &= \xi^T M_q^{-1} (I - J^+ J^T) M_q (I - J^+ J) M_q^{-1} \xi k_p \geq 0 \end{aligned} \quad (2.462)$$

因而可知,在实现手臂末端目标速度 $\dot{\mathbf{r}}_d$ 的同时,利用冗余性,可以让手臂的位形沿着使 ω 值增大的方向运动。

对于图 2.72 中的手臂,将采用上述方法的结果示于图 2.73 中。另外,如果取 $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T$ 、 $\mathbf{r} = [x, y]^T$ 。设 $l_1 = l_2 = 1$ 、 $l_3 = 0.3$ 、 $\mathbf{T}_q = \mathbf{I}_3$ 、 $\mathbf{T}_r = \mathbf{I}_2$, 末端目标轨迹的要求是,在 1s 内从初始位形 $\mathbf{q}_0 = [20^\circ, 30^\circ, 20^\circ]^T$ 沿着与 Y 轴平行方向向下运动至 $y = -0.1$ 。图 2.73(a) 是未利用冗余性的情况,图 2.73(b) 是利用冗余性的情况。显然,后者可以回避奇异状态。



(a) 未利用冗余性的情况($k_q=0$)



(b) 利用冗余性的情况($k_q=20$)

图 2.73 回避奇异点的仿真

吉川恒夫

适当的机械柔软性。所谓柔软性,广义上称之为柔顺性。借助于柔顺性,或者能够使末端执行器产生避让作用,不使对方及自己本身受到损坏,或者能够利用对方作为定位导向,或者以所期望的力作用于对方。像这样一类机器人在约束空间中的运动控制技术人们一般称之为机器人的力控制(广义)或柔顺控制(compliant motion)。在实际作业现场,有时可以根据需要,一边在位置控制与力控制之间进行切换,一边实施作业。

迄今为止,非常多的研究人员针对机器人力控制技术进行了研究,提出了各种各样的控制方案。追溯它的历史,在 20 世纪 60 年代,人们就开始研究机器人手臂的计算机力控制问题。从 20 世纪 70 年代后半期到 20 世纪 80 年代前半期,不断提出了至今仍有重要意义的基础控制方法。1985 年,Whitney 发表了有名的综述论文^[30]。另外,日本机器人学会也在 1991 年提出了技术发展总结报告^[33,37]。在世纪之交,可以说,关于刚性构件机器人的主要控制方法已经相当成熟了,在一部分工业机器人中已经得到实际应用^[67]。

在本节中,首先用简单的例子叙述力控制的必要性及概况;然后,就迄今所有控制方法的体系分类加以研究,分别按类介绍具有代表性的控制方法;最后进行分类比较。需要指出的是,在本节中所涉及的机器人,是单臂刚性无冗余自由度的开式链机械手,但是仅涉及它的控制规律问题,而未论及它的应用。

1. 力控制作业举例

如果用机器人来代替人类日常进行的作业,也许我们就能理解机器人力控制的必要性了。作为一个作业的例子,让我们设想在桌子上铺一张纸,用笔画出一条正确的直线来。

可以想象,让只具有位置控制功能的机器人的末端握笔来完成这一作业是非常困难的。原因是在机器人的机构中,不可避免地存在着构件长度等运动学参数方面的误差。因而,依据这些有误差的参数计算的正运动学和逆运动学的解将与实际值不符,结果导致末端轨迹直线精度的误差。即使假设这些

2.4.2 力控制

工业机器人的作业大致可以分为两大类:一类是焊接及喷涂等在自由空间中的作业;另一类是去毛刺、研磨、组装等与环境有接触的、在约束空间中的作业。在自由空间中最重要的是如何高速且正确地控制末端执行器的位置和姿态,即如何提高对位置和姿态目标值的跟踪特性。

另外,对去毛刺、研磨、组装等有约束的空间中的作业,大前提是与环境的接触。此时必须事先考虑机器人与接触环境之间将要发生的相互作用力,要设法以某种方式提供

运动学是理想的,位置控制系统本身也不可避免地存在误差,动作速度越快,动力学对它的影响就越显现出来,渐渐地发生偏离目标直线轨迹的情况。再就要提到纸面垂直方向的运动问题,若机器人与桌面的距离不正确,在误差的影响下,笔尖或者被压坏,或者无法得到正确的笔压,使线条变得模糊不清。

那么,我们在日常操作中是怎样进行的呢?在这样的情况下,人们并不是徒手画线,而是借助于直尺(图 2.74)。无论怎样善于用笔画线的人,也不如像用直尺那样能画出正确的直线。此时,人们让手腕带有适当的柔性,把握好笔端与直尺的边缘接触,同时不施加过大的力,这样既避免了直尺移动,又使笔端贴紧直尺的边缘。即应该在沿着直尺长度的方向(图 2.74 中的 X 方向上)上实施位置控制,在垂直方向(图 2.74 中的 Y 方向上)以很放松的形态实施力控制。人们从幼儿阶段开始就接受这样的训练,无意识地便掌握了操作的技巧。所谓描画正确的直线这种作业的本质乍一看似乎属于笔尖的位置控制,实际上它不靠本身的位置控制精度,而是通过对对方(环境)进行柔顺仿形动作,实现自己原本无法达到的高精度位置控制。

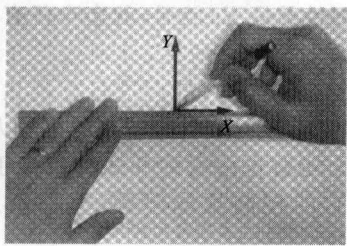


图 2.74 用笔在纸上画直线的作业

由该例子可知,力控制作业的基本点在于,首先使手腕具有柔顺性,再向对方(环境)实施仿形动作。这里存在以下两个重要的问题:

- ① 用什么样的方法实现柔性?
- ② 以多大的柔性加上多大的力?

问题①属于运动控制的问题,是本章的主题。至于问题②,它是以问题①的解决为前提的,决定如何实现给定作业所期望的控制方法、增益、目标值的问题。这属于机器人运动规划和作业规划的课题,与作业任务有关,不涉及本节所研究的内容。

在下面,我们首先介绍实现被动柔顺的方法,然后对主动柔顺方法进行分类,对典型力控制方法加以解释。

2. 被动柔顺的应用

被动柔顺最简单的实现方法是在实施位置控制的机器人手腕与工具之间插入弹簧或阻尼器等纯粹机械构件的方法。这样做不涉及驱动器的使用问题,因此属于被动且固定的方法。图 2.75 给出机器人末端安装多达 3 个移动自由度和 3 个旋转自由度的柔顺机构的示意图。随着工具、零部件几何形状的不同,以及环境几何学、力学的状态差异,这种被动柔顺的具体实施细节在实际作业现场中呈现出千差万别。总之,需要在分析各种作业的工艺条件后,设计制造满意的专用弹簧和阻尼器件。如果是大批量生产,那么就不需要频繁地更换专用工具,在多数情况下,即使不特地采取主动方法,用这些固定的柔顺机构也就足够了。这样的解决方案与其说是系统设计方法,还不如说是从个别案例的学习中积累起来的,或者根据长年的直觉和经验总结的诀窍。

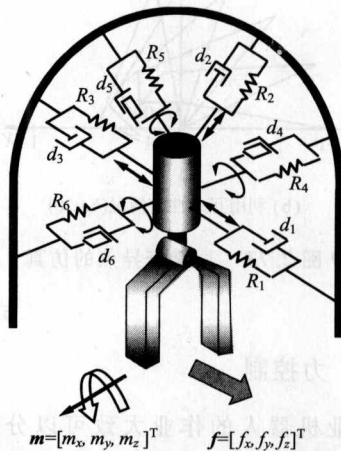


图 2.75 用弹簧和缓冲器支承的手部

不过,人们对一类十分通用且重要的工业应用,例如,将销轴插入孔穴中的 peg-in-hole 作业^[62~65]或将同一形状的方形物品紧密地装入方箱中的 box-palletizing^[30,49,50]作业,进行了详细的力学分析,提出了最佳的工程设计方法。特别是在 peg-in-hole 作业中,一个典型的例子是人们开发了称为 RCC(Remote Center Compliance)的专用插入工具(图

2.76)。在文献[65]中,针对销轴与孔的接触状态进行了详细的力学分析,得到了一个有意思的结论:如果抓持销轴的柔软机构的柔顺矩阵在销轴的前端形成对角矩阵时,那么这样的结构的插入成功概率最高。人们开发出若干种这样的机械结构,不过在关键的一点上都是相同的,即基本上都将柔性构件(橡胶等)按照几何学的方法进行配置。

被动柔顺的方法不需要昂贵的力传感器,在成本上具有实用性。但是由于弹簧常数及其几何学上的方向性使柔顺特性无法改变,因此从本质上看它还存在缺乏通用性的问题。所以,人们又提出了新的方法,即在实施位置控制的手臂末端安装多个自由度的小型驱动器,利用它们的控制系统来实现任意弹簧和阻尼器的特性,以确保其通用性^[42,44,61]。

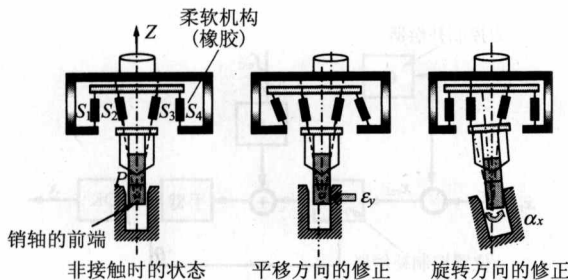


图 2.76 RCC 装置^[39]

3. 主动柔顺方法

不依靠被动机械构件的柔顺性,改用关节角度传感器或末端安装的力传感器,与关节电机组成伺服控制系统,利用伺服系统实现主动柔顺控制动作,这种方式一般称为力控制,本节中的主要内容是将这些方式加以归纳和介绍。力控制的控制器往往嵌在机器人控制器软件的内部,因此可以编程,具有通用性。本节提及的方法被为数众多的控制工程或机械工程的研究人员在探索中逐步得到并改进。分析已有方法中的观点,它们在多数情况下或是被包含在其他已有的方法里,或是可以借助于多个已有方法的组合加以解释,因此按照系统对力控制方法进行分门别类是很重要的。特别是方法的名称,一般都由它的作者来命名,往往会出现个别名称混同于一般方法论名称的情况。由此看来,重要的是从本质上对其加以区分。事实上也存

在几种不同的分类观点,但一般来说,以下两种分类方法为大家所熟知^[33,37,40]。

① 阻抗控制和混合控制。

② 基于位置控制以及基于转矩控制。

下面首先介绍前者,因为它在研究柔顺动作的概念方面占有非常重要的地位。然后,介绍与后者有关的几个典型的控制方法,从体系结构的角度看,后者对控制方法的分类更合理一些。

1) 阻抗控制和混合控制

这些方法在理论上并非是明显对立的概念,但在文献[35],[36]中其相关术语在概念上被扩展了,一般被认为是不同的研究方法。

阻抗控制可以认为是将前述的被动柔顺实现方法向主动柔顺扩展的一种控制方法。即该方法将角度传感器或力传感器与电机构成伺服系统,主动实现与纯粹机械阻抗同样的力学效果。原本阻抗这个术语是类比电路交流阻抗而被引入的,意味着质量、阻尼器、弹簧等机械构件组合起到力学阻抗的作用。

下面举最简单的单自由度小车的例子来加以说明。在图 2.77 中,带有阻尼器 d_0 和弹簧 k_0 的质量为 m_0 的小车,在未施加阻抗控制的状态下受到外力 f_{ext} 的作用,它的运动方程式为 $f_{\text{ext}} = m_0 \ddot{x} + d_0 \dot{x} + k_0 x$ 。假设借助于某种手段能够测量该小车的位置、速度、加速度和外力 f_{ext} ,而且利用这些量求解出驱动器的操作量为 $f_u = -k_p x - k_d \dot{x} - k_a \ddot{x} + k_f f_{\text{ext}}$ 进行补偿,则整个系统的运动方程式变成 $(1+k_f)f_{\text{ext}} = (m_0+k_a)\ddot{x} + (d_0+k_d)\dot{x} + (k_0+k_p)x$ 。由此可知,通过适当地选择位置、速度、加速度的反馈增益 k_p 、 k_d 和 k_a ,就能够自由地改变原来的阻抗,即 m_0 、 d_0 和 k_0 。另外可知,力的反馈增益 k_f 具有增加或减少外来作用于小车的力的大小的作用。

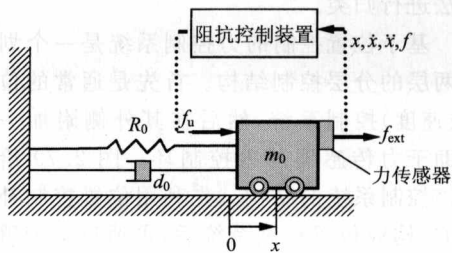


图 2.77 主动阻抗控制的示意图

该例子是一个理想化的例子,在实际系统中,既无法简单地测量加速度,又存在外力对传感器动力学的影响等因素,当然讨论就不像上面那么简单了^[41]。单自由度系统的考虑方法是多自由度手臂阻抗控制的基础。举例来说,图 2.78 给出了 3 个自由度手臂实现末端阻抗控制的示意图。基于阻抗控制的作业策略就是将适当的阻抗作用在机器人与外界接触面上,通过适当调整阻抗值和运动目标值(位置、速度、力等)来完成作业。

混合控制是一种解耦控制方法,它在适当的垂直作业坐标上,将自由度分解为控制力的自由度和控制位置的自由度,独立组成跟踪各自目标值的伺服系统。以前述用直尺画直线的作业为例,则具体的考虑就是对直尺与笔端之间的接触力实施力控制,同时对沿直尺方向的笔端的位置实施独立的位置控制。

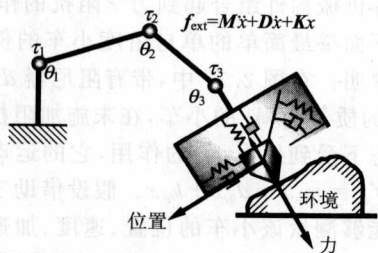


图 2.78 3 自由度手臂的阻抗控制示意图

关于阻抗控制和混合控制更详细的比较考察,将在本节的 7. (2) 中加以说明。

2) 基于位置的控制和基于转矩的控制

这两种是根据控制系统的体系结构进行分类的。分类的关键是力控制系统中的作为操作量输入究竟是位置,还是关节转矩。这样做有利于从系统的角度对为数众多的已有方法进行归类。

基于位置控制的力控制系统是一个划分为两层的分层控制结构。首先是通常的位置(或速度)控制系统,然后在其外侧附加一个借助于力传感器的力控制环。图 2.79 给出了该控制系统的结构。先利用位置控制补偿器 G_p 构成位置控制系统后,再通过力传感器测量的力 f_{ext} 构成 G_f 补偿器,向位置控制目标值进行反馈。

基于转矩控制的力控制系统不采用前者所用的分层控制系统结构,而改成直接发出关节转矩指令作为操作量,有的场合也可以不需要采用力传感器(图 2.80)。

下面首先介绍机器人手臂及外界环境的建模,并讲解以该观点分类的典型控制方法。

4. 机器人手臂及环境的建模

针对 n 个构件的刚性机器人手臂的特性,建模的方法如下所述。本节为了简化问题,建模时假设重力和摩擦力的影响可以忽略。虽然接触外界本身应该具有复杂的非线性阻抗特性,同样为了简单起见,这里将它仅考虑成单纯线性的弹簧元件。图 2.81 给出 2 自由度机械手的坐标系设置,下标的 ref 表示目标值,“~”表示指定值,ext 表示来自外部的输入。

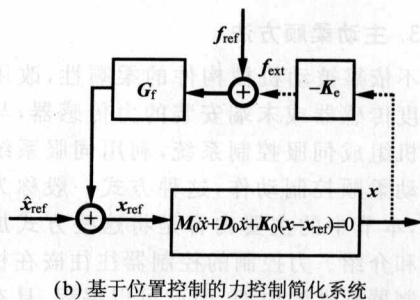
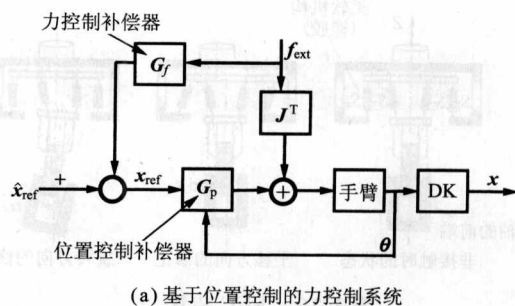


图 2.79 基于位置控制的力控制系统的组成

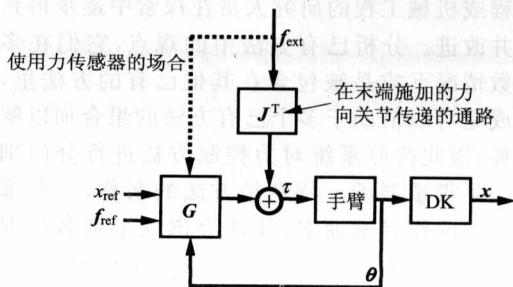


图 2.80 基于转矩控制的力控制系统

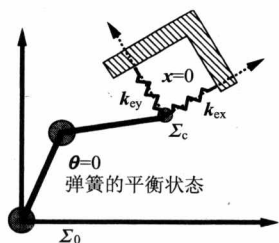


图 2.81 2 自由度手臂的坐标系设置

机械手的运动学为

$$\mathbf{x} = \mathbf{DK}(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.463)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{IK}(\mathbf{x}) \quad (2.464)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.465)$$

机械手的动力学为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{J}^T \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.466)$$

环境的动力学为

$$\mathbf{K}_e \mathbf{x} = -\mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.467)$$

式中, $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为关节角(图 2.81); $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为在固定于环境上的正交作业坐标系 Σ_c 中的位置及姿态; $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为关节转矩; $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 为哥氏力、离心力; $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为雅可比矩阵; $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为惯性矩阵(正值对称); \mathbf{DK} 为 direct (forward) kinematics(正运动学); \mathbf{IK} 为 inverse kinematics(逆运动学); $\hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{D}}, \hat{\mathbf{K}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 分别为指定的惯性、黏性、刚性矩阵; $\hat{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{K}}^{-1}$ 为指定的柔顺矩阵; $\hat{\mathbf{A}} = \hat{\mathbf{D}}^{-1}$ 为指定的调节矩阵; $\mathbf{K}_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为环境刚性矩阵(正值对称)。

5. 基于位置控制的力控制系统的典型方法

位置控制方式有非常多的形式,但无论什么样的形式,基本前提可以看成是它们都尽可能地设法加大带宽,使 \mathbf{x} 与 \mathbf{x}_{ref} 一致。例如,可采用将独立关节控制系统与 \mathbf{IK} 组合的方式,或者采用如图 2.85 所示的在作业坐标中直接构成伺服的方式等。在一般工业机器人实施力控制的场合,若将位置控制系统的带宽设置得足够宽(通常设定为高增益),则在多数情况下由于以下的理由可以忽略式(2.466)中的哥氏力和离心力等非线性动力学因素的影响。

① 各个关节齿轮的传动比非常大。

② 在积极实施力控制的场合,手臂的运动速度一般比较低。

于是,我们可以认为位置控制系统的局

部动作是线性的。但是,如果在整个频带中都做 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{ref}}$ 这样的理想化处理多少有点勉强。所以,一般的工业机器人大多被近似地描述为下述线性动力学形式:

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}_0 \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_0 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) = \mathbf{0} \quad (2.468)$$

式中, $\hat{\mathbf{M}}, \hat{\mathbf{D}}, \hat{\mathbf{K}}$ 为正值对称常数矩阵。式(2.468)的重要意义在于,它不再有式(2.466)中所含的 \mathbf{f}_{ext} 项。这种情况就意味着系统对于外力不再敏感,即所谓机器人维持原状的刚性非常硬,即使用手推动手臂的任何部分都不会引起微小的变动。因此,在手腕上安装力传感器,用其直接测量外力,并将收集的信息提供给位置控制系统,就能实现顺从运动(compliant motion)。下面在式(2.468)的基础上,我们来解释各种各样的力控制方式。

1) 刚性(柔顺)控制(图 2.82)^[30,35]

柔顺控制或刚性控制的名称是不同的研究者使用的名称,并未加以统一整理,但是共同的目的是在末端实现弹簧效果。在基于位置控制的前提下,以如下的方式进行校正,达到位置目标与外力成正比的目的:

$$\mathbf{x}_{\text{ref}} = \hat{\mathbf{x}}_{\text{ref}} + \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{ref}}) \quad (2.469)$$

式中, \mathbf{x}_{ref} 为新的位置目标值。

下面针对末端完全不受外界约束的自由空间,以及处于如式(2.467)所示的刚性环境的约束空间的两种情况,来研究机械手的动态表现。

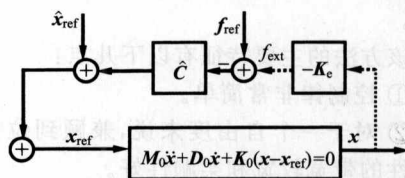


图 2.82 刚性控制

【自由空间】

若将式(2.469)代入式(2.468)中,则成为

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}_0 \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_0 (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}_{\text{ref}}) = \mathbf{K}_0 \hat{\mathbf{C}}(\mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{ref}}) \quad (2.470)$$

因此,在 $\mathbf{f}_{\text{ref}} = \mathbf{0}, \mathbf{f}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$ 时, \mathbf{x} 跟踪 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ref}}$, 并施加力 \mathbf{f}_{ext} 时,对位置目标值进行校正。值得指出的是,对于任意的 $\hat{\mathbf{C}}$, 式(2.470)是稳定的,例

如在自由空间也能够设定为 $\hat{C} < 0$ 等^[59, 60]。这一点与通常的“机械弹簧”或通过位置信息反馈实现的“电气弹簧”(例如,图 2.85 的 \hat{K}) 在本质上是不同的,称之为广义柔顺(同样是广义阻抗等)。在 x 与 x_{ref} 一致的静态状态下,若设 $x_{\text{ref}} = 0$,则可将广义刚性 \hat{K} 更一般地描述为

$$\hat{K}x = f_{\text{ext}} - f_{\text{ref}} \quad (2.471)$$

该值越小,换句话说 \hat{C} 越大,则越“柔软”。即在 $\hat{C} = \hat{K}^{-1} > 0$ 的情况下,位置控制系统的带宽越宽,越能实现接近于纯粹机械“弹簧”的力学响应。另外,在将 \hat{C} 看作是力控制器的场合,它实际上是属于比例控制器,对于阶跃状力目标值 f_{ref} ,存在稳态偏差, \hat{C} 越大,则偏差越小。

【约束空间】

在末端受到如式(2.467)所示的刚性环境约束时,设 $\hat{x}_{\text{ref}} = 0, f_{\text{ref}} = 0$,根据式(2.467)和式(2.470),得到

$$M_0 \ddot{x} + D_0 \dot{x} + K_0(I + \hat{C}K_e)x = 0 \quad (2.472)$$

因此,若 $K_0 \hat{C}K_e > 0$,则系统可以说是广域渐进稳定的。不过有一点要注意,即尽管有 $K_e > 0$,并且 $\hat{C} > 0$,但是 $\hat{C}K_e > 0$ 未必就成立。

当然,如果位置控制系统是理想的,那么在 $\hat{C} > 0$ 时,系统始终是稳定的。以上关于稳定性的分析是在理想状态下进行的,即将手臂看作刚性,不考虑力传感器的动力学,并且假设控制器的运算时间为零的条件下得出的结果,现实系统的稳定性必须取得更保守一些。

该方法的主要特征有以下几点:

- ① 控制律非常简单。
- ② 对于一个自由度来说,兼顾到位置控制特性的带宽较宽和柔顺性好。
- ③ 在 \hat{C} 较大时,由于力传感器动力学等的影响,难以确保与高刚性环境接触时的稳定性。

2) 阻尼控制(图 2.83)^[30]

按照外力的积分来校正位置目标值的方案,控制律如下所示:

$$x_{\text{ref}} = \int [\hat{v}_{\text{ref}} + \hat{A}(f_{\text{ext}} - f_{\text{ref}})] dt \quad (2.473)$$

式中, \hat{v}_{ref} 为新的速度指令值。

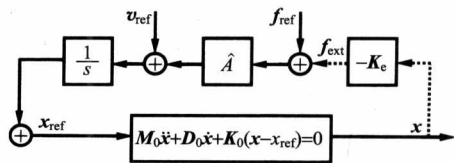


图 2.83 阻尼控制

【自由空间】

在末端完全不受任何外界约束的自由空间中, $f_{\text{ref}} = 0$,由式(2.468)及式(2.473),有

$$M_0 \ddot{x} + D_0 \dot{x} + K_0 x = K_0 \int (\hat{v}_{\text{ref}} + \hat{A} f_{\text{ext}}) dt \quad (2.474)$$

因此,对任意的 \hat{A} ,系统是临界稳定的,在 $f_{\text{ext}} = 0$ 时, \dot{x} 跟踪 v_{ref} 。在速度为 0 时($\dot{x} = 0$),若设 $x = x_{\text{ref}}, \hat{v}_{\text{ref}} = 0$,则可实现下式的广义阻尼(广义黏性):

$$\hat{D}\dot{x} = f_{\text{ext}} - f_{\text{ref}} \quad (2.475)$$

即在 $\hat{D} > 0$ 的条件下,位置控制系统的带宽越宽(K_0 越大),越能实现接近于纯粹机械阻尼的力学响应。当 $\hat{A} = \hat{D}^{-1}$ 时,由于具有校正速度的作用,因此也有时称之为校正矩阵(accommodation)^[30, 49]

【约束空间】

在末端受到如式(2.467)所描述的刚性环境约束的场合,设 $v_{\text{ref}} = 0, f_{\text{ref}} = 0$,若根据式(2.467)、式(2.468)及式(2.473),用 3 阶微分表现形式,则成为

$$M_0 \ddot{\ddot{x}} + D_0 \ddot{\ddot{x}} + K_0 \dot{\ddot{x}} + K_0 \hat{A} K_e x = 0 \quad (2.476)$$

在这种情况下,无法确认 $\hat{A} = 0$ 就是稳定性的充分条件。但是,若位置控制系统在实用的范围内有足够宽的带宽,即式(2.468)中的 M_0 及 D_0 可视为 0 的范围内,若 $\hat{A} = 0$,则可以认为是稳定的。该方法的主要特征有以下几点:

- ① 控制律简单。
- ② 对于一个自由度,兼顾到位置控制特性的带宽较宽和阻尼低。
- ③ 借助于积分效果,容易降低高频带机械共振的峰值,与图 2.82 相比,容易确保约束空间的稳定性。

④ 将 \hat{A} 看作是在约束空间中的力控制器时,由于积分补偿的影响,对于阶跃波形的力目标值来说,不存在稳态误差。

3) 阻抗控制

阻抗控制的名称同样被不同的研究者频繁使用,也并未将其加以统一和整理,但它们的共同目的是在末端实现质量、阻尼和弹簧效果。因此,在这里将前述1)及2)两个小节的内容加以扩展,在 $f_{\text{ref}}=0$ 时,控制律如下所示:

$$\mathbf{x}_{\text{ref}} = (s^2 \hat{\mathbf{M}} + s \hat{\mathbf{D}} + \hat{\mathbf{K}})^{-1} \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.477)$$

式(2.477)能够按照图2.84来实现。在式(2.468)中,取 \mathbf{K}_0 为较大的值,在 $\mathbf{x}=\mathbf{x}_{\text{ref}}$ 近似成立的范围内,式(2.477)成为

$$\hat{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} = \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.478)$$

能够实现 $\hat{\mathbf{M}}$ 、 $\hat{\mathbf{D}}$ 、 $\hat{\mathbf{K}}$ 的阻抗。

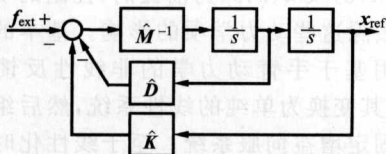


图 2.84 阻抗调节补偿器

该方法的主要特征有以下几点:

- ① 能够实现任意广义阻抗。
- ② 对于一个自由度,兼顾到位置控制特性的带宽较宽和阻抗低。

以上针对位于内环的直角坐标系位置控制系统的控制方式进行了说明,至于速度控制系统的情况也可以用同样的方式加以考虑,下面介绍具有代表性的系统。

4) 伪柔顺控制^[47]

这是一种采用关节独立的速度控制系统,并给出了速度目标值,利用力传感器实现所希望的刚性、黏性、惯性的方式。

$$\dot{\theta}_{\text{ref}} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{M}^{-1} \int (\mathbf{f}_{\text{ext}} - \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} - \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}}) dt \quad (2.479)$$

在低频段,由于可将实际的关节速度视为与目标值一致,即

$$\mathbf{M}\mathbf{J}\dot{\theta} = \int (\mathbf{f}_{\text{ext}} - \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} - \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}}) dt \quad (2.480)$$

将式(2.480)进行积分,得到

$$\hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} = \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.481)$$

式(2.481)的特征如下:

- ① 控制律简单。
- ② 由于包含雅可比逆矩阵运算,因此在奇异点附近必须加以注意等。

6. 基于转矩控制的控制系统(图2.80)

以下介绍关于直接指定关节转矩作为操作量的控制方式,我们将根据是否带有非线性动力学补偿的观点来对其进行分类。

1) 无动力学补偿的控制法

(1) 采用雅可比转置的直角坐标系中的PD控制律(图2.85) 属于这一类的例子可以举出Salisbury的active stiffness control^[48]方法。该方法不需要借助于力传感器,操作量是关于位置及速度的反馈,如下式所示:

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{J}^T [\hat{\mathbf{K}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) + \hat{\mathbf{D}}(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}})] \quad (2.482)$$

在自由空间中,根据式(2.466)和式(2.482),则成为

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{D}}(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_{\text{ref}}) + \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{K}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}) = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.483)$$

由式(2.483)可见,与基于位置控制的力控制系统有所不同,它包含有非线性动力学项,但在低速且在平衡点($\mathbf{x}=0, \mathbf{x}_{\text{ref}}=0$)附近时,由于可看成是 $\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \cong 0, \mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{K}(\boldsymbol{\theta}) \cong \mathbf{J}\boldsymbol{\theta}$,故有

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{D}}\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}^T \hat{\mathbf{K}}\mathbf{J}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.484)$$

所以,当 $\hat{\mathbf{K}} > 0$ 且 $\hat{\mathbf{D}} > 0$ 时,系统渐近稳定。再根据 $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}} \cong \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}}$,除奇异姿态($|\mathbf{J}|=0$)以外,末端设定的阻抗成为

$$\mathbf{J}^{-T} \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{J}^{-1} \ddot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{K}}\mathbf{x} = \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.485)$$

说明即使姿态发生变化,刚性 $\hat{\mathbf{K}}$ 及黏性 $\hat{\mathbf{D}}$ 也是一定的。另外,惯性虽然发生变化,但它始终保持正值性。这样,刚性 $\hat{\mathbf{K}}$ 及黏性 $\hat{\mathbf{D}}$ 分别对应于位置控制系统的位置增益及速度增益。

在约束空间中,根据式(2.485)及式(2.467),而成为如下式子:

$$\mathbf{J}^{-T} \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{J}^{-1} \ddot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{D}}\dot{\mathbf{x}} + (\hat{\mathbf{K}} + \mathbf{K}_e)\mathbf{x} = \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (2.486)$$

因此,仍然可知在平衡点附近渐近稳定。将该方法的主要特征归纳如下:

- ① 处于平衡点附近时,在任何被动的环境下均能保持稳定性。
- ② 不必借助于力传感器。
- ③ 末端的柔顺性及阻尼不因姿态的变化而变化。
- ④ 对于一个自由度,兼顾到位置控制特性的带宽较宽和具有较高的柔顺性。
- ⑤ 机器人的姿态不是唯一的。

此外,还有并不是在末端的直角坐标系中构成伺服系统,而是通过调整独立关节的柔性设定末端任意一点的柔性的方法^[58]以及这种方法的扩展^[59]等

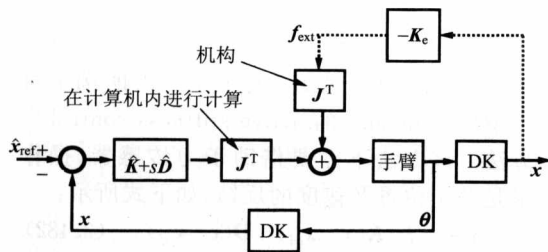


图 2.85 采用 J^T 的直角坐标系中的 PD 控制

(2) 混合控制 混合控制法是一种在作业坐标系中将控制力的方向与控制位置的方向加以分解,分别构成各自的控制环的方法。例如,有名的 Raibert and Craig 的混合控制^[35]方法,控制律的构成如下(图 2.86):

$$\hat{\tau} = G_p J^{-1} (I - S)(x_{ref} - x) + G_f J^T S(f_{ref} - f_{ext}) \quad (2.487)$$

式中, I 为单位矩阵; S 为控制方式选择矩阵。力控制的自由度取 1, 位置控制的自由度取 0。 G_p 与 G_f 分别为位置控制对角补偿器矩阵及力控制对角补偿器矩阵。该控制律没有考虑动力学的影响, 因此在高速运动时控制方式之间会产生相互耦合。

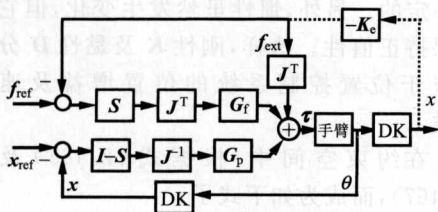


图 2.86 位置与力的混合控制器

该方法发表以后,为众多研究者所引用,他们认为与控制律本身相比,更重要的是作业坐标系中位置与力的混合控制的具体方法^[52~56]。例如,有文章指出,由于在从直角空间向关节空间的变换中采用 J^{-1} , 因此末端阻抗的正值性无法得到保持,在自由空间中的稳定性取决于姿态^[52]。另外,有人指出对仅使用 J^T 的方法来说,若适当确定控制增益,则无论自由空间或约束空间,均能保证大范围的渐近稳定性^[53]。还有人提出,控制自由度与关节一一对应的近似方式。

有报告针对与混合控制相关的几个理论问题进行了很有意思的研究。众所周知,例如曾有文献针对解耦的理论基础,即正交性,指出由于位置与角度在物理的维数上有区别,因此在理论上存在错误^[45],有些文献还对此提供了解答^[45]等。

2) 有动力学补偿的控制法

前面介绍的所有方法中,关于手臂动力学的影响都基于下述的立场:

① 该影响小到能够忽略(本节 1.)。

② 能够利用内环的反馈控制,将该影响抑制在很小的范围内(本节 5.)。

这里介绍的力控制方法,是以已知动力学项 $M(\theta)$ 及 $h(\theta, \dot{\theta})$ 为前提的,控制的功能是严格去除这些动力学项的影响。基本的做法是利用基于手臂动力学的非线性反馈或前馈,将其变换为单纯的线性系统,然后组成通常的固定增益伺服系统。至于线性化时获得所需要的外力 f_{ext} 的方式被分成两类:一类直接从传感器测量;另一类从约束环境的几何信息中获得。前者的代表有 Hogan 的 impedance control,作为后者的代表有吉川的动态混合控制等。

(1) 力传感器直接测量外力的方式 这种方式根据得到的线性系统是对应于关节坐标系还是对应于作业坐标系,又可以进一步大致分为以下两种方式:

① 对应于关节坐标系。若设新的操作量为 u_θ , 对式(2.466)进行非线性补偿,则有

$$\tau = h(\theta, \dot{\theta}) - J^T f_{ext} + M(\theta)(u_\theta + J^T f_{ext}) \quad (2.488)$$

则得到对应于关节坐标系的 2 次线性系统

$$\ddot{\theta} = u_\theta + J^T f_{ext} = u_\theta + \tau_{ext} \quad (2.489)$$

由于动力学不随姿态的变化而变化,因此可以借助于固定增益进行各种反馈,因此控制方法有多种形式。

② 对应于作业坐标系^[36,57,66]。设新的操作量为 u_x , 对式(2.466)进行如下式所示的非线性补偿,则有

$$\tau = h(\theta, \dot{\theta}) - J^T f_{ext} + M(\theta) J^{-1} (u_x + f_{ext} - \dot{J} J^{-1} \dot{x}) \quad (2.490)$$

则得到对应于作业坐标系的 2 次线性系统

$$\ddot{x} = u_x + f_{ext} \quad (2.491)$$

Hogan 的 impedance control 基本上与此

方案相同,设操作转矩为

$$\tau = h(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta)J^{-1}[\dot{J}\dot{\theta} + \hat{M}^{-1}(\hat{D}\dot{x} + \hat{K}x)] + [M(\theta)J^{-1}\hat{M}^{-1} - J^T]f_{\text{ext}} \quad (2.492)$$

据此可以设定末端阻抗为

$$\hat{M}\ddot{x} + \hat{D}\dot{x} + \hat{K}x = f_{\text{ext}} \quad (2.493)$$

该方法的主要特征有以下几点:

- 不受动力学的影响,能够实现任意阻抗。

- 控制律相当复杂。

(2) 动态混合控制^[38] 动态混合控制可以说是从文献[35]的基本思想出发,在明确的约束坐标系和非线性动力学补偿的观点上发展起来的方法。如果环境的几何学信息和手臂动力学模型全部已知,那么就不必通过力传感器进行测量,而是从手臂对环境所加的力,基于作用与反作用的关系来预测动力学补偿所需要的接触力。该方法首先用超曲面方程式来描述末端受到的来自对象的约束,严格规定位置控制及力控制的方向;接着根据已知的手臂动力学将每个自由度变换为解耦的线性系统;然后,每个简化线性系统的自由度各自组成通常的反馈控制系统。这时,将力传感器引入控制环中。详细内容请参阅文献[38],[39]等。

该方法的主要特征有以下几点:

- 力控制和位置控制的各个自由度在动力学层面上都是完全解耦的。

- 由于控制律中包含环境几何信息,因此如果设定的接触状态与实际不符,那么就难以预计系统的响应。

7. 两种方法的比较

1) 基于位置控制的力控制系统与基于转矩的力控制系统的比较

上面按照操作量的类别和是否含有非线性动力学补偿的观点,对有价值的控制方法进行了分类并作了简要的说明。当然,读者随后就会对如何评价它们提出疑问,到底哪一个方法是最好的?对此,从客观上非常难以回答。正如迄今为止我们所了解的,机器人运动控制系统是由三个基本要素构成的,即与雅可比矩阵等运动学有关的 kinematics function、与惯性矩阵等动力学有关的 dynam-

ics function 以及与伺服补偿器(狭义控制系统)有关的 servo function。控制系统的整体性受到两个因素的制约:一个是上述三个 function 之间的整体框架;另一个是伺服补偿器的性能本身。因此,很难从单方面对性能进行评价。

在此不介绍与 servo function 有关的好坏问题,仅从基于位置控制的力控制系统与基于转矩的力控制系统的角度,对两者进行比较,定性地研究它们的优劣。基于位置控制的力控制系统的优点可以归纳如下:

- ① 具备与已有的位置控制系统很好的兼容性。

- ② 能够独立于位置控制系统,单独设定阻抗特性。

- ③ 无需动力学补偿,因此控制系统的结构一般比较简单。

另外,它也有如下一些缺点:

- ① 力控制系统(广义)的性能(含稳定性)取决于内环位置控制系统的带宽和环境刚性。

- ② 若位置控制系统的带宽过大,则会因未计入力传感器动力学和伺服相位滞后等因素的影响,当机器人与坚硬环境接触时,容易出现不稳定。

基于转矩的力控制系统的优缺点基本上与上面各项相反。如果再考虑机器人机构的特性,应该说前者适合于以工业机器人为代表的高减速比手臂,而后者适合于动力学研究中常见的低减速比或 DD 型手臂。

2) 阻抗控制与混合控制的比较

阻抗控制与混合控制两者似乎在概念上不同,实际上却是同一个控制器,只是考察的角度不同,有时其可视为阻抗调节器,有时又可以视为力控制系统中的补偿器。若以图 2.79(b)中的控制系统为例来考察,可以整理为如表 2.5 所示的结果。在自由空间中的阻抗调节器(补偿环节)可以理解为与环境接触时的力控制器。

因此,阻抗控制与混合控制的不同点,与其说是在于控制器本身的差异,不如说是获取控制量的方法(对阻抗控制来说是位置,对混合控制来说是位置和力)以及设计的空间(对阻抗控制来说是自由空间,对混合控制来说是自由和约束空间)的区别。另外,在采用

的方法方面也表现出本质上的不同:混合控制采用每个自由度都完全解耦的方法,相反,在阻抗控制中则希望方法也能适用于积极利用耦合项的场合^[49, 50]。

表 2.5 G_f 的两种考察角度的比较

意义 G_f	力控制器	阻抗调节器
比例项	比例控制	柔顺
积分项	积分补偿	阻尼的倒数
双重积分项	双重积分补偿	惯性的倒数
微分项	力控制响应的衰减效果	对外力的适应性(上升)

结果两者在运动控制本质上的区别体现在对单自由度控制特性的要求方面。在混合控制中,力控制方向的自由度通常仅考虑力的显式反馈,丝毫未考虑位置指令的响应性。与此不同的是,阻抗控制的目标原本就是在实行位置控制的高精度、高刚性手臂的末端实现任意机械阻抗,所以特别关注全部 6 个自由度的位置控制特性。换句话说,是“对于单个自由度独立地设定高速高精度的位置控制特性和适当的阻抗特性”。这样就避免了“对于单个自由度同时实施位置控制和力控制”双重要求的这种力学上的矛盾。

“阻抗控制”这种提法在控制工程中并不恰如其分。人们提及“位置控制”和“力控制”,是因为系统状态量的位置或力之一被取作了控制量;阻抗的情况则完全不同,它是靠位置与力之比描述的物理量,不是控制量,说到底,它是由控制增益而决定的“设定值”。从这个意义上看,也许称之为“指定或设定阻抗”更贴切些。但因为“阻抗(柔顺)控制”这个提法已经约定俗成了,而且实际上也并未产生过什么误解,所以在这里就沿用了这个术语。

岩城 敏

2.5 并联机构

2.5.1 概念

并联机构虽然没有正式的定义,不过根据日本机器人学会基本一致的意见将其定义如下:所谓并联机构,是通过多个运动副和多个连杆组成的系统(运动链)分别将基座与输出部分(输出构件)并联连接起来的机构的总

称^[1]。为了与单一的闭式链机构进行区别,英文称之为 parallel mechanism、in-parallel-actuated(-connected) mechanism、closed kinematic chain mechanism 等。在 JIS 中,并联机器人被定义为“在基座与机械接口之间的机械结构中具有多个动力传递路径的机器人”^[2]。

作为具有代表性的例子,可以举出统称为史都华平台(Stewart platform)或 Stewart-Gough platform 机构。图 2.87 所示是该机构用作驾驶仿真器的应用场合,它是用 6 条具有 6 个运动副关节的运动链将基座部分与驾驶舱并联连接起来的机构。不过在它的各条运动链的 6 个运动副关节中,仅有 1 个运动副是主动驱动,剩下的 5 个运动副均属于自由运动的被动关节。其结果是,输出部分能够在驱动器的驱动下实现平移、旋转等 6 个自由度的运动,完成与多关节手臂(串联机构)同样的功能。

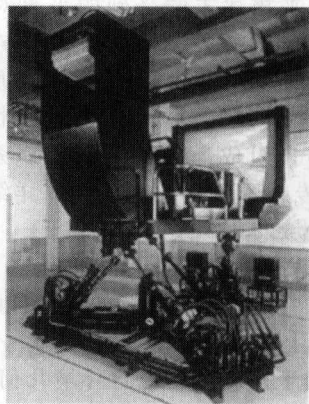


图 2.87 Stewart-Gough platform 的例子
(茅场工业)^[9]

为了实现 6 个自由度,不一定必须用 6 条运动链。例如,在 6 个运动副的运动链中,若让 2 个运动副是主动的,那么就可以用 3 条这样的运动链来实现 6 个运动自由度。但是,在这样的场合,并联机构的性质将受到限制。所以,人们有时也将具有 6 条运动链的机构称为完全并联机构。相反,将少于 6 条运动链的机构称为不完全并联机构或部分并联结构。根据 Gruber 公式,用相似的运动链构成的完全并联机构分别仅具有 2 个、3 个、6 个自由度。图 2.88 所示为 6 个自由度的空间机

构和3个自由度的平面机构的例子。

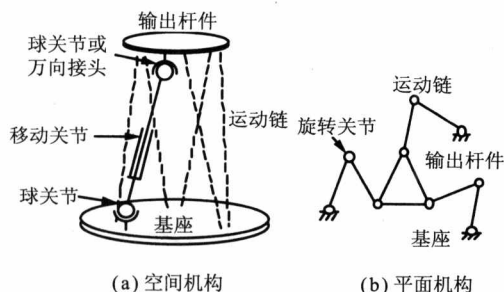


图 2.88 并联机构的机构例子

2.5.2 历史

最初能够实现多自由度运动的并联机构可以追溯到1947年由Gough开发的轮胎试验机构。这就是上面所谓的史都华平台机构,后来正如人们所看到的,由Stewart等开发出了应用于飞行的仿真器^[3],再后来还将其用于部分娱乐设备。其后,从20世纪70年代至80年代,并联机构由于在机器人手臂和定位机构中广泛的应用背景被人们所关注,提出了各种各样的机构形式。至于驱动的方法,除了最初的液压缸的直线型驱动器外,还出现了采用电机的旋转型驱动(如 δ 机构手臂和HEXA中见到的)。旋转型驱动这种形式允许将电机固定在基座上,其特征在于可旋转部分的质量小,因此容易提高其速度。进入90年代后,并联机构还被尝试应用于加工和装配作业,在1994年美国公布了世界上第一台采用并联机构的机床。近年来,并联机构还被应用于微型手部,以及显微镜观察的超精密平台。

2.5.3 主要的机构

史都华平台构造是针对液压缸驱动器设计的。运动链中无论哪一个运动副作为主动都具有自由度,即使是驱动旋转关节也能够构成并联机构。 δ 机构手臂及图2.89所示的HEXA手臂属于旋转型输入并联机构。即使是使用直线驱动器,也可以将驱动器部分设计成固定在基座上(为方便起见称为移动固定型)。

图2.90所示为典型的实现6个自由度空

间定位的并联机构。除此之外,还有用缆绳

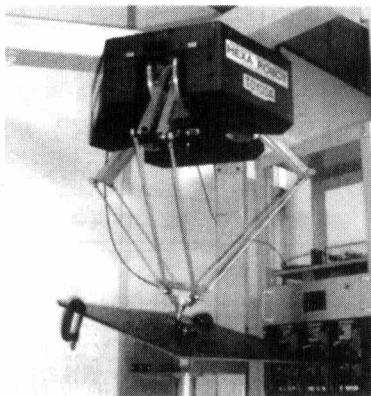


图 2.89 HEXA 并联机构(东北大学)^[10]

或钢丝张力来驱动输出部分的方式,它们也可以称为广义并联机构。但是,根据力封闭原理,必须构成冗余驱动。

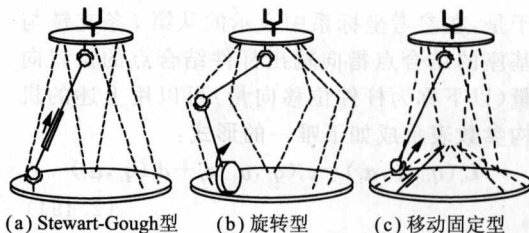


图 2.90 空间机构的典型例子

2.5.4 运动分析

将并联机构作为分析对象,设它的输出杆件具有空间6个自由度,并具有6条运动链。

1. 运动学

并联机构的运动学可以将逆运动学作为基础来求解。逆运动学是在给出输出杆件在参考坐标系上的位置 $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ (T 表示转置) 和方向(正交矩阵 R 或欧拉角 ϕ, θ, ψ) 的条件下求解主动运动副关节位移的计算。下面给出一个对于前面所举的三个空间机构典型例子都适用的分析方法^[4]。

图2.91所示为输出杆件与各杆件之间的几何学关系。在基座的中心取参考坐标系,在输出杆件的中心取固定于该杆件的末端坐标系。输出杆件通过6条运动链(以下称为支链)与基座进行连接。

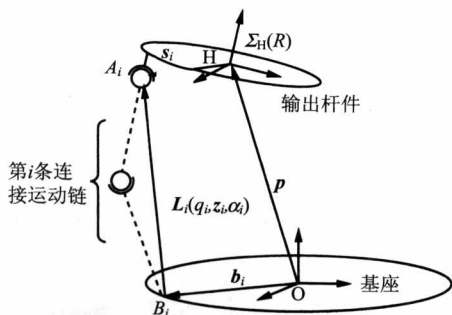


图 2.91 基座与输出杆件的几何学关系

各运动链的机构参数定义如下。 b_i 表示基座与连接运动链的结合点的位置向量; $^h s_i$ 表示输出杆件与连接运动链的结合点的位置向量,左上角标 h 表示用末端坐标系来描述。设 q_i 为输入(主动)运动副的位移, z_i 表示与输出杆件连接的杆件的轴向单位向量, α_i 为表示杆件长度、扭转角等的机构其他参数的向量。于是,在参考坐标系中表示的从第 i 条支链与基座的结合点指向输出杆件结合点的位置向量(以下称为杆件位移向量)可以用上述的机构参数表示成如下唯一的形式:

$$L_i(q_i, z_i, \alpha_i) = c_i(q_i, \alpha_i) z_i + d_i(q_i, \alpha_i) \quad (2.494)$$

式中, $c_i(q_i, \alpha_i)$ 为标量; $d_i(q_i, \alpha_i)$ 为向量。

由此,第 i 条支链与输出杆件的位置关系可以描述如下:

$$p + R^h s_i - b_i = L_i(q_i, z_i, \alpha_i) \quad (2.495)$$

式中, R 为表示输出杆件在参考坐标系中的方向的 3×3 正交矩阵。式(2.495)是并联机构运动学的基本方程式。由此可知,逆运动学一般可以按照下述的顺序求出。根据式(2.495),将 z_i 作为 p 、 R 及其他参数的函数表示,由于 $|z_i| = 1$,因此能够得到下面含未知数 q_i 的标量方程式:

$$|z_i(q_i, p, R, {}^h s_i, b_i, \alpha_i)| = 1 \quad (2.496)$$

一般来说,式(2.496)属于非线性方程式,不一定能求得出通解,但对于由移动型或旋转型驱动的并联机构,这一点则不成问题。

应该指出,并联机构的正运动学一般是联立二次方程式,所以求出解析解不大容易。不过,如果借助于下一小节所示的微位移关系,利用牛顿-拉夫松法进行反复迭代,就能比较简单地推算出末端位置姿势,并达到足够的精度。例如,图 2.92 所示的具有特殊杆

件配置的 Stewart-Gough 型机构(TSSM; Triangular Symmetric Simplified Mechanism),已知其最多具有 16 个解析解^[5]。

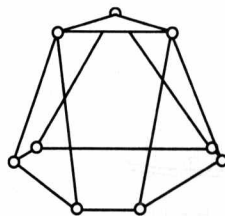


图 2.92 TSSM 机构的杆件配置

2. 微位移分析

为了进行输出杆件的速度分析和精度分析,必须研究输入运动副或机构参数等的微位移与输出杆件的微位移之间的关系,即开展所谓的微位移分析。微位移分析的方法是求解式(2.495),具体做法如下。首先,将式(2.495)的两边进行微分

$$\begin{aligned} \delta p + \delta R^h s_i + R \delta^h s_i - \delta b_i \\ = \frac{\partial L_i}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L_i}{\partial z_i} \delta z_i + \frac{\partial L_i}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i \end{aligned} \quad (2.497)$$

式中, δp 、 δR 为与输出杆件平移和旋转有关的微位移; δq_i 为输入微位移; $\delta^h s_i$ 、 δb_i 、 $\delta \alpha_i$ 为机构参数的微位移(或机构误差)。在这里,考虑到 $\partial L_i / \partial z_i$ 是标量,在微位移分析中按照下述做法消去不需要的变量 $\delta \alpha_i$ 。由于 $\delta \alpha_i$ 与 z_i 的内积为零,因此若计算式(2.497)的两边与 z_i 的内积,则得到

$$\begin{aligned} z_i^T \delta p + z_i^T \delta R^h s_i + z_i^T R \delta^h s_i - z_i^T \delta b_i \\ = z_i^T \frac{\partial L_i}{\partial q_i} \delta q_i + z_i^T \frac{\partial L_i}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i \end{aligned} \quad (2.498)$$

式中,若用表示绕参考坐标轴的微旋转的微旋转向量 $\delta \Omega$ 来描述相对于方向的微位移,则 δR 表示如下:

$$\delta R = [\delta \Omega \times] R \quad (2.499)$$

$$[\delta \Omega \times] \equiv \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & -\Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.500)$$

整理式(2.498),得到下面的关系式:

$$\begin{aligned} (z_i^T (R^h s_i \times z_i)^T) [\delta p] \\ = \left(z_i^T \frac{\partial L_i}{\partial q_i} \right) \delta q_i + \left(z_i^T R \quad z_i^T \quad z_i^T \frac{\partial L_i}{\partial \alpha_i} \right) \begin{bmatrix} \delta^h s_i \\ \delta b_i \\ \delta \alpha_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.501)$$

式中, \times 表示向量积。将式(2.501)用于 i 从 1~6, 并对其加以整理, 可以求出与微位移有关的如下的关系式:

$$J_1 \delta \mathbf{x} = J_2 \delta \mathbf{q} + J_3 \delta \mathbf{\Gamma} \quad (2.502)$$

式中, 新的变量如下式所示:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta \mathbf{p}^T \ \delta \mathbf{\Omega}^T]^T \in \mathcal{R}^6$$

$$\delta \mathbf{q} = [\delta q_1 \ \cdots \ \delta q_6] \in \mathcal{R}^6$$

$$\delta \mathbf{\Gamma} = [\delta^h \mathbf{s}_1^T \ \delta \mathbf{b}_1^T \ \delta \mathbf{\alpha}_1^T \ \cdots \ \delta^h \mathbf{s}_6^T \ \delta \mathbf{b}_6^T \ \delta \mathbf{\alpha}_6^T]^T \in \mathcal{R}^{36+6N}$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1^T & (\mathbf{R}^h \mathbf{s}_1 \times \mathbf{z}_1)^T \\ \vdots & \\ \mathbf{z}_6^T & (\mathbf{R}^h \mathbf{s}_6 \times \mathbf{z}_6)^T \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

$$J_2 = \text{diag} \left[\mathbf{z}_1^T \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial q_1} \ \cdots \ \mathbf{z}_6^T \frac{\partial \mathbf{L}_6}{\partial q_6} \right] \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1^T \mathbf{R} \mathbf{z}_1^T & \mathbf{z}_1^T \frac{\partial \mathbf{L}_1}{\partial q_1} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{z}_6^T \mathbf{R} \mathbf{z}_6^T & \mathbf{z}_6^T \frac{\partial \mathbf{L}_6}{\partial q_6} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{6 \times (36+6N)}$$

式(2.502)表示输入位移的误差及机构参数的误差对末端定位误差的影响。若考虑微时间 δt 的微位移, 则能够得到与速度有关的如下式所示的关系:

$$J_1 \dot{\mathbf{x}} = J_2 \dot{\mathbf{q}} \quad (2.503)$$

表 2.6 给出各机构形式的逆运动学, 以及微位移系数 J_2 。

再将式(2.503)进行时间微分, 可求得如下式所示的加速度表达式:

$$J_1 \ddot{\mathbf{x}} + \dot{J}_1 \dot{\mathbf{x}} = J_2 \ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_2 \dot{\mathbf{q}} \quad (2.504)$$

式中, \dot{J}_1 和 \dot{J}_2 为 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\dot{\mathbf{z}}_i$ 的函数, 由式(2.497)中的 $\delta \mathbf{z}$ 可以容易求得 $\dot{\mathbf{z}}_i$ 。

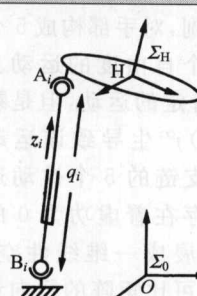
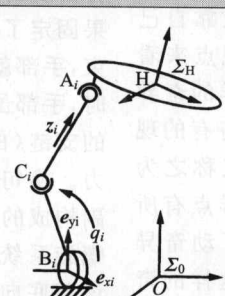
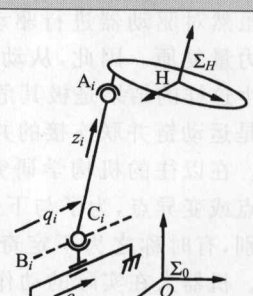
3. 静力学

静力学的任务是求出杆件发生力与末端执行器的发生力或力矩之间的关系。设各杆件发生的力为 t_i , 输出杆件发生的力及力矩分别为

$$\mathbf{f} = (f_x, f_y, f_z)^T \text{ 和 } \mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)^T$$

式中, f_i 及 m_i 分别表示沿基座坐标系的 i 轴方向的力及力矩。根据虚功原理可以求得下式:

表 2.6 代表性的并联机构的运动学

Stewart-Gough 型	旋转型	移动固定型
 <p>$\overrightarrow{OH} = \mathbf{p}, \overrightarrow{OB_i} = \mathbf{b}_i, \overrightarrow{HA_i} = \mathbf{h}_i$</p>	 <p>$\overrightarrow{OH} = \mathbf{p}, \overrightarrow{OB_i} = \mathbf{b}_i, \overrightarrow{HA_i} = \mathbf{h}_i$ $\overrightarrow{A_i C_i} = l_{1i}, \overrightarrow{B_i C_i} = l_{2i}$ $\mathbf{e}_{xi} = \mathbf{e}_{yi} = 1$</p>	 <p>$\overrightarrow{OH} = \mathbf{p}, \overrightarrow{OB_i} = \mathbf{b}_i, \overrightarrow{HA_i} = \mathbf{h}_i$ $A_i C_i = l_i, \mathbf{e}_{ai} = 1$</p>
$L_i = q_i \mathbf{z}_i$	$L_i = l_{1i} \mathbf{z}_i + l_{2i} (\mathbf{e}_{xi} \cos q_i + \mathbf{e}_{yi} \sin q_i)$	$L_i = q_i \mathbf{e}_{ai} + l_i \mathbf{z}_i$
$q_i = \mathbf{w}_i $ $\mathbf{w}_i = \mathbf{p} + \mathbf{R}^h \mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i$	$q_i = \arcsin(c_i / \sqrt{a_{xi}^2 + a_{yi}^2} - d_i)$ $a_{xi} = (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{e}_{xi}), a_{yi} = (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{e}_{yi})$ $c_i = (\mathbf{w}_i ^2 + l_{1i}^2 - l_{2i}^2) / 2l_{2i}$ $\mathbf{w}_i = \mathbf{p} + \mathbf{R}^h \mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i$ $d_i = \arg(a_{yi} i + a_{xi})$ $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})$ 为 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 的内积, i 为虚数单位	$q_i = (\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{e}_{ai}) \pm \sqrt{(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{e}_{ai})^2 - \mathbf{w}_i ^2 + l_i^2}$ $\mathbf{w}_i = \mathbf{p} + \mathbf{R}^h \mathbf{s}_i - \mathbf{b}_i$
$J_2 = I \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$	$J_2 = \text{diag}[\mathbf{z}_i^T \mathbf{f}_i] \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ $\mathbf{f}_i = l_{2i} (-\sin q_i \mathbf{e}_{xi} + \cos q_i \mathbf{e}_{yi})$	$J_2 = \text{diag}[\mathbf{z}_i \cdot \mathbf{e}_{ai}] \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$

$$\delta \mathbf{x}^T \mathbf{F} - \delta \mathbf{q}^T \mathbf{T} = 0 \quad (2.505)$$

将微位移的关系式(2.502)代入式(2.505)中,能够得到以下的关系式:

$$\mathbf{F} = (\mathbf{J}_2^{-1} \mathbf{J}_1)^T \mathbf{T} \quad (2.506)$$

4. 奇异点

机械手属于多自由度结构,有的位置和姿态对力学性质有很大的影响。人们将这样的位置和姿势称为奇异点,即在此位置姿势下,微位移关系所对应的系数矩阵为非正则(指正方矩阵的场合,如果是冗余驱动时为非正方矩阵,那么此时矩阵呈现退化的趋势,秩小于行数)。若不考虑参数的变动,根据式(2.502),并联机构的微位移关系可以表示如下:

$$\mathbf{J}_1 \delta \mathbf{x} = \mathbf{J}_2 \delta \mathbf{q} \quad (2.507)$$

这里,我们来介绍矩阵 \mathbf{J}_1 及 \mathbf{J}_2 分别为非正则的情况。

(1) $\det \mathbf{J}_1 = 0$ 时 在这样的位置姿势条件下,输出杆件即使沿 \mathbf{J}_1 零空间所对应的方向(\mathbf{e}_{null})运动,也完全无法产生位移。即杆件的发生力对输出杆件的 \mathbf{e}_{null} 方向完全不起作用,失去了该方向的刚性。若机构陷入这样的点,则或者由于因发生失控而导致损坏,或者虽然对驱动器进行驱动,却无法依靠自己的力量复原。因此,从动作控制的观点来看发生这样的结果是极其危险的。这样的奇异点是运动链并联连接的并联机构所特有的现象。在以往的机构学研究中,也有人称之为死点或变异点,为了与下述(2)的奇异点有所区别,有时称之为不定奇异点或超可动奇异点。机器人在实际的动作中若陷入这样的奇异点,是无法靠自身的力量解脱的,因此在动作控制中必须避开这样的奇异点。例如,图2.92所示的机构,人们发现有7种奇异点^[6]。

(2) $\det \mathbf{J}_2 = 0$ 时 这是沿 \mathbf{J}_2 零空间所对应的方向输出杆件无法产生运动的位置姿势。根据式(2.502)中的 \mathbf{J}_2 的形式可知,第 i 条支链如果有

$$\mathbf{z}_i^T \frac{\partial \mathbf{L}_i}{\partial \mathbf{q}_i} = 0 \quad (2.508)$$

会发生 \mathbf{q}_i 的运动对于 \mathbf{z}_i 方向不起作用的情况。这无非就是第 i 条支链作为串联杆件时的奇异点。在 δ 机构或 HEXA 手臂中,其对应于输入杆件与中间杆件成一条直线的情

况。但在采用球关节的史都华平台中并不存在这样的奇异点。该奇异点也可称为静止奇异点或低可动奇异点。如在多关节机械手的奇异点问题中所指出的那样,若为了使并联机构的输出杆件动作而发出 \mathbf{z}_i 方向的强制运动指令,驱动器就会接受到无穷大的动作指令,结果导致驱动器失控或损坏。

5. 对偶性

并联机构的运动学和静力学的计算,与串联机构(多关节型手臂)之间具有对偶性。即在并联机构中,逆运动学能以自然的形式通过解析求出,而在串联机构中,正运动学通过坐标变换矩阵的简单乘积之后也能以自然的形式求出。这种关系在对微位移的分析中表现得很明显。这种对偶性还可以借助于矩量代数,用旋量与力螺旋的关系来说明^[7]。总而言之可以表述如下:在串联机构中,手部的速度用主动运动副的运动副旋量的线性耦合来表示,即手部运动属于运动副旋量的扩展空间,因而该运动副旋量是雅可比矩阵的列向量。另外,在并联机构中,多个支链分别对手部构成约束,从而决定了运动。在6个自由度的并联机构场合中,在6个支链中如果固定了5个主动运动副,对手部构成5个约束,手部就只能获得1个自由度的运动。这时,手部虽然进行着某特定的运动,但是剩下的支链(的主动运动副)产生导致该运动的力。换句话说,在一条支链的5个被动运动副构成的旋量系统中,存在着虚功为0的力螺旋系统,其集合将扩展成一维线性空间。该基底向量就是与逆雅可比矩阵的行向量相对应的元素。

6. 动力学

并联机构动力学的任务在于分析输入运动副中发生的转矩与输入运动副加速度或输出杆件加速度之间的关系。人们提出了基于虚拟树结构开式链机构的逆动力学求取闭式链机构的逆动力学方法。并联机构被视为闭式链机构的部分集合后,就能够着眼于各条运动链的独立性和并联驱动的性质,高效率地开展逆动力学运算^[8]。算法如下所述:

① 根据输出杆件的目标加速度 $\ddot{\mathbf{x}}$, 利用式(2.503)及式(2.504),求出各条运动链的

包含输入运动副在内的所有运动副的速度 \dot{q} 及加速度 \ddot{q} 。

② 假设将5条支链与末端板的连接点切断(切断的运动副被称为切断运动副),分别对于切断的5条运动链及一条连接的支链+输出杆件,采用开式链系统(串联机械手)的动力学计算(例如,拉格朗日法、牛顿-欧拉法)方法,求出各运动副的发生转矩 τ_0 。

③ 设全运动副位移 q_a 与输出杆件位移 x 的微位移的关系为 $\delta q_a = G\delta x$,若设从该矩阵 G 中除去与切断运动副相对应的行集合而成矩阵 S ,则主动运动副所必需的转矩 τ 可由下式求出:

$$\tau = S^{-1}W'\tau_0 \quad (2.509)$$

2.5.5 并联机构与串联机构的对比

将并联机构的力学与串联机构的进行比较,其对比结果可整理如下:

① 在史都华平台或者在移动固定型或旋转型输入中,中间杆件两端等效于球面关节的场合,逆运动学的求解一般比较容易,微位移分析也一样,可以从输出杆件的微位移直接通过矩阵运算求出各个杆件的微位移,与串联机构的情况具有对偶性。因此,在参考坐标系中实施并联机构输出杆件的轨迹控制时,相关的计算并不费事。不过,根据杆件位移求解输出杆件的位置方向的计算反而要困难一些,需要想一点办法解决。

② 在静力学中,正向计算可以通过直接的矩阵运算求出,这时也会呈现出与串联机构之间的对偶性。对于并联机构来说,根据杆件的发生力来推算输出杆件的发生力或转矩不是很困难。反之,为了求解力控制所需要的杆件发生力,必须进行逆矩阵的运算,需要花费较大的计算量。

③ 处于奇异点的举动,若在串联机构,输出杆件将失去沿某个方向的运动,而在并联机构,则表现为输出杆件无法产生沿某个方向的力或力矩。

与传统的串联机构(例如,仅由旋转运动副构成的多关节手臂)相比,史都华平台的特征可归纳为以下几点:

- 输出部分产生的力大。

- 刚性高。
- 可动部分质量轻,运动特性好。
- 机构紧凑,运动自由度多。
- 求解逆运动学简单。
- 可使用汽缸机构或直线驱动机构,驱动器的选择范围比较宽松。
- 能使驱动器及关节机构同轴,价格便宜,维护方便。
- 工作空间较小。
- 求解正运动学的解析解极其困难。

2.5.6 应用设备

1. 大功率输出设备

并联机构的特点之一是输出功率大,重物的搬运或定位、盾构机等工程机械是适合它应用的领域。

2. 精密定位

能在工作区域的中心附近实现高精度的定位,可用于大型天线精密定位、显微镜观察、精密加工用高精平台等。将压电元件用作驱动器的 Stewart-Gough 机构的驱动模块,然后构成微机械手,能以亚微米的精度来操作微米数量级的微小对象。其他用途例如,焊接生产线的大型变位机、超声波马达微小运动平台等。

3. 仿真器

飞行仿真器已经有很长的历史了。供娱乐用的驱动机构其实与飞行仿真器的用途差不多。骑马仿真器不仅用于娱乐,还期待在康复治疗方面发挥更大的作用。最近小型驾驶仿真器的应用逐渐增多。

4. 高速手臂

δ 机构手臂高速操作手臂当初是为巧克力装箱的应用背景而被开发出来的。旋转型驱动的并联机构可动部分的质量轻,充分利用其这一特点,可以制作加速度高达数十个 g 的超高加速的高速手臂。5 杆 SCARA 型机器人目前已经广泛应用于小型零部件的高速搬运作业。

5. 小型手部

能够做成6个自由度或3个自由度的小型手部,将它安装在手臂末端,它具有灵巧的

操作性能。

6. 触觉装置

可开发成遥控操作中的力反馈主手臂或操作杆。也可用作触觉装置的机构。

7. 机床

1994年, Giddings & Lewis公司在芝加哥展览会上展出了一台采用并联机构设计的机床, 引起了业界的极大关注。之后, 美国、日本等机床生产厂家开始着手进行并联机床的开发。韩国开发的 Eclipse 采用了冗余机构, 能以加工点为中心围绕加工点做 360° 旋转, 非常便于工件的加工。在 20 世纪 60 年代有人就指出, Stewart 能够适用于铣床, 这个应用也使人们感兴趣。

8. 其他

并联机构还可用于康复装置或辅助医疗设备, 至于其他的各种用途。例如, 用于开放式核磁共振成像技术 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) 支持下的手术机械臂、超多自由度手臂的模块机构等。

新井健生

2.6 柔性臂

2.6.1 柔性臂的力学

对于给定的任务来说, 有时机器人手臂未必能够满足刚性的要求, 结果往往导致在高速定位时发生振动。在这种场合, 显然不应该将机器人的手臂当成刚体来处理。人们称刚性相对较低的机械手为柔性臂。为了抑制机器人手臂运动中的振动, 传统设计中唯一的措施是加大机器人手臂的刚性。与此相反, 柔性臂的研究则是在维持机器人手臂较低刚性的前提下, 如何通过控制来抑制振动, 以便得到与高刚性手臂同样的控制性能^[1,8,9,11]。

柔性臂的研究始于 1970 年初, 发端于搭载在宇宙飞船上的航天用轻型机械手的振动抑制要求^[1]。现在, 不仅是以空间站等为代表的航天机器人, 大到大型工程机械, 小到硬盘驱动装置等, 许多机械装置在定位时都面临如何解决振动的问题, 其实它们彼此的振动机理非常相似。在广义上, 其他领域中也面临同样的情况, 即需要通过控制工程的方

法来抑制由于机械结构上刚性的不足而导致的振动^[22,23]。

引发柔性臂振动的诱因可以考虑两条:

①手臂本身的刚性不足; ②减速器部分的刚性过低。例如, 对于大型工程机械、硬盘装置等来说, ①可能是引起振动的主要诱因, 但是对于工业机器人来说, 往往②是主要诱因。至于航天机械手, 则①、②都是诱因。

众所周知, 在机器人结构设计和求解动态特性(用于控制)等阶段, 都需要对柔性臂进行建模。建模方法有: ①有限元法; ②转移矩阵法; ③模态法; ④刚体模型近似法^[1,11,14]。

①和②是传统结构分析中的常用方法, 对复杂形状的机器人手臂的分析很有效, 但无法将它直接用于控制。③适用于比较简单的机器人手臂对象, 从偏微分方程所描述的系统求解模态区域中的动态特性。④以刚体和弹簧元素来近似研究对象, 用于高刚性(不大发生弯曲)手臂。在③的模态法中, 又可以划分为约束模态法、非约束模态法两种: 约束模态法在建模时假设关节是刚性的, 而手臂是柔性的, 即将柔性臂视为悬臂梁, 被固定在关节一侧; 非约束模态法建模时从头至尾都将关节部分和柔性臂作为一体来处理, 即它们并非一端被固定, 而是旋转的机构^[22]。与约束模态法相比, 非约束模态法在数学上容易理解, 每个模态在公式的表述上也是独立的, 因此简单明了, 但难以向多运动链的柔性臂扩展。

1. 单杆件弯曲振动系统的建模和动态特性

本小节将说明单杆件弯曲振动的建模方法^[3,4,10], 它是多自由度和多杆件柔性臂建模的基础。这里利用模态法, 求出如图 2.93 所示的单杆件手臂的动态特性。该柔性臂是长度为 l 的悬臂梁, 一端固定在关节上, 另一端有重量块, 对它进行建模。在建模时有以下假定条件:

①手臂质量均匀, 具有同样的截面, 变形小, 而且仅产生弹性变形。

②手臂非常细长, 可以忽略旋转惯性矩及剪切力的影响。

③手臂仅产生横向振动, 不产生纵向振动。

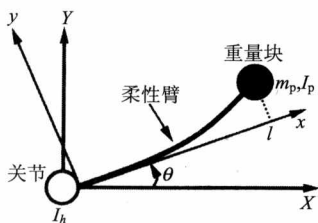


图 2.93 单杆件弯曲振动系统的模型

④ 手臂仅在水平面内运动,无重力影响。

在图 2.93 中,设置以关节中心为原点的参考坐标系 $X-Y$ 及手臂坐标系 $x-y$ 。手臂坐标系原点设置在关节与手臂的连接点上。从参考坐标系变换为手臂坐标系的变换矩阵表示如下:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & r_h \cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & r_h \sin\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.510)$$

式中, θ 为关节旋转角; r_h 为关节部分的半径。

若利用该变换矩阵将手臂坐标系的点 $[x, y(x, t)]$ 用参考坐标系的点 (X, Y) 表示出来,则可以得到下式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos\theta - y \sin\theta + r_h \cos\theta \\ x \sin\theta + y \cos\theta + r_h \sin\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.511)$$

由此,手臂的动能 K_a 可表示为

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{1}{2} \rho A \int_0^l (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) dx \\ &= \frac{1}{2} \rho A \int_0^l [(x + r_h)^2 \dot{\theta}^2 + \dot{y}^2 + y^2 \dot{\theta}^2 \\ &\quad + 2(x + r_h) y \dot{\theta}] dx \end{aligned} \quad (2.512)$$

式中, ρ 为手臂的密度; A 为手臂的截面积; l 为手臂长度。

关节和重量块的动能可表示为

$$K_j = \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}^2 \quad (2.513)$$

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{1}{2} \{ m_p (\dot{X}_p^2 + \dot{Y}_p^2) \\ &\quad + I_p [y'(l, t) + \dot{\theta}]^2 \} \end{aligned} \quad (2.514)$$

式中, I_h 为关节的惯性矩; m_p 为重量块的质量; I_p 为重量块的惯性矩。

(X_p, Y_p) 表示参考坐标系中的重量块的位置,在计算式(2.511)时,可设置 $x=l, y=y(l, t)$ 。另外, $y' = \partial y / \partial x$ 。根据式(2.512)~式(2.514),可以求出整个系统的动能 K_T 。

接着求出系统的势能。由于仅需要考虑手臂的弹性变形即可,因此该系统的势能 P_T 如下式所示:

$$P_T = \frac{1}{2} \int_0^l EI (y''(x, t))^2 dx \quad (2.515)$$

式中, E 为手臂的纵向弹性系数; I 为手臂的截面 2 次矩。

设加在关节上的驱动转矩为 τ ,则驱动器做的虚功 δW 为

$$\delta W = \tau(t) \cdot \delta \theta \quad (2.516)$$

根据上述情况,利用哈密顿原理,求该系统的动态特性方程式和边界条件,结果如下:

$$\begin{aligned} \rho A \int_0^l [(x + r_h)^2 \ddot{\theta} + 2y(x, t) \dot{y}(x, t) \dot{\theta} \\ + y(x, t)^2 \ddot{\theta} + (x + r_h) \ddot{y}(x, t)] dx \\ + I_h \ddot{\theta} + I_p (\ddot{y}'(l, t) + \ddot{\theta}) + m_p [(l + r_h)^2 \ddot{\theta} + 2y(l, t) \dot{y}(l, t) \dot{\theta} \\ + (l + r_h) \ddot{y}(l, t)] = \tau(t) \end{aligned} \quad (2.517)$$

$$\begin{aligned} \rho A [\ddot{y}(x, t) + (x + r_h) \ddot{\theta} - y(x, t) \dot{\theta}^2] \\ + EI y'''(x, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.518)$$

$$\begin{aligned} m_p [\ddot{y}(l, t) + (l + r_h) \ddot{\theta} - y(l, t) \dot{\theta}^2] \\ - EI y'''(l, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.519)$$

$$I_p [\ddot{y}'(l, t) + \ddot{\theta}] + EI y''(l, t) = 0 \quad (2.520)$$

$$y(0, t) = y'(0, t) = 0 \quad (2.521)$$

式中,定义函数 V 为系统的动能与势能之和,若计算函数 V 的时间微分,则得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\theta} \tau + \int_0^l \{ \rho A [\ddot{y} + (x + r_h) \ddot{\theta} - y \dot{\theta}^2] \\ &\quad + EI y''' \} y dx + \{ m_p [\ddot{y}(l, t) \\ &\quad + (l + r_h) \ddot{\theta} - y(l, t) \dot{\theta}^2] \\ &\quad - EI y'''(l, t) \} y(l, t) + [I_p (\ddot{y}'(l, t) \\ &\quad + \ddot{\theta}) \\ &\quad + EI y''(l, t)] y'(l, t) \} \\ &= \dot{\theta} \tau \end{aligned} \quad (2.522)$$

在式(2.522)的求导过程中,使用了式(2.517)~式(2.521)。于是根据式(2.522)中的关系,有下式成立:

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{\theta} \tau dt &= \int_0^t \dot{V} dt = V(t) - V(0) > -V(0) \\ &= -\alpha^2 \end{aligned}$$

式中,设输入为 τ ,输出为 $\dot{\theta}$,该系统的被动性

得到了保证。在考虑机械手的控制时,被动性应该是一个重要的性质^[25]。

下面采用变量分解法求解式(2.517)和式(2.518)所描述的柔性臂动态特性方程式。变量分解法也有约束模态法和非约束模态法两种解法,在本小节里采用约束模态法来求解。因此,可按下式来规定手臂的位移:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (2.523)$$

式中, $q_i(t)$ 是模式坐标; $\phi_i(x)$ 是由式(2.518)~式(2.521)导出并满足下面条件。

$$EI\phi''''(x) - \rho A \Omega^2 \phi(x) = 0 \quad (2.524)$$

$$\phi(0) = 0, \phi'(0) = 0 \quad (2.525)$$

$$EI\phi'''(l) + \Omega^2 m_p \phi(l) = 0 \quad (2.526)$$

$$EI\phi''(l) - \Omega^2 I_p \phi'(l) = 0 \quad (2.527)$$

另外,模态函数应满足下述正交条件:

$$\begin{aligned} \rho A \int_0^l \phi_i(x) \phi_j(x) dx + m_p \phi_i(l) \phi_j(l) \\ + I_p \phi_i'(l) \phi_j'(l) = \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2.528)$$

根据式(2.517)和式(2.518)可知,该柔性臂的动态特性方程式为非线性方程式,因此将手臂的振动视为微振动,进行线性化处理,将式(2.523)代入式(2.517)和式(2.518)中,通过利用式(2.524)~式(2.527)及正交条件式(2.528),经过整理,得到如下式所示的柔性臂动态特性方程式:

$$\begin{aligned} \left[\rho A \int_0^l (x + r_h)^2 dx + I_h + I_p + m_p (l + r_h)^2 \right] \ddot{\theta} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\rho A \int_0^l (x + r_h) \phi_i(x) dx \right. \\ \left. + I_p \phi_i'(l) + m_p (l + r_h) \phi_i(l) \right] \ddot{q}_i(t) \\ = \tau(t) \end{aligned} \quad (2.529)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + \left[\rho A \int_0^l (x + r_h) \phi_i(x) dx \right. \\ \left. + m_p (l + r_h) \phi_i(l) + I_p \phi_i'(l) \right] \ddot{\theta} \\ + \Omega_i^2 q_i(t) = 0 \end{aligned} \quad (2.530)$$

由这些式子可知,柔性臂存在无限个振动模态。这里,将振动模态的阶数取到 N 阶为止,近似地表示动态特性方程式。另外,假定作用于系统的衰减阻力对各个模态的作用是独立的,对式(2.530)附加衰减项,并将式(2.529)和式(2.530)进行归纳,得到下式:

$$M \ddot{q} + D \dot{q} + K q = f \tau \quad (2.531)$$

式中, q 为

$$q^T = [\theta \quad q_1 \quad \cdots \quad q_N]$$

由此,该系统的状态方程式可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}f \end{bmatrix} u \\ &= Ax + bu \end{aligned} \quad (2.532)$$

其中,

$$x = [q^T(t) \quad \dot{q}^T(t)]^T, u = \tau$$

为了检测柔性臂的弯曲状态,可以考虑采用:①应变仪;②加速度计;③CCD摄像头;④PSD;⑤陀螺仪;⑥力传感器等。利用这些传感器测量手臂弯曲,先求出观测方程式如下:

$$y = Cx \quad (2.533)$$

于是,根据式(2.532)及式(2.533)就能够求出单杆件微小弯曲振动系统的动态特性方程式,并基于它实施各种振动抑制控制。

2. 单杆件扭转振动系统的建模及动态特性

短轴(例如,转轴等)的扭转振动一般可以用弹簧-质量系统来代替,但是在手臂等较长的杆件条件下,则必须考虑高阶振动模态^[6,7]。因此,我们将柔性臂看成是固定在刚性关节的一端,而在它的末端附加有重量块的模型,采用约束模态法(与上述弯曲振动系统相同)对单杆件扭转振动建模。这里仅考虑柔性臂微小范围内的扭转振动,假定弯曲及其他振动一概不发生。根据上述假设,在建模时,如图2.94所示,建立柔性臂扭转振动系统的坐标系。在图2.94中, θ_h 为刚性关节扭转角, θ 为柔性臂任意点的扭转弹性变形所导致的旋转位移角,设 θ 是微角度。

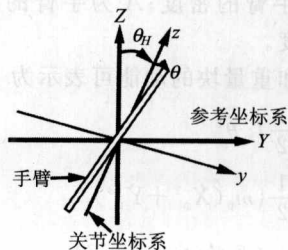


图 2.94 扭转振动系统的坐标系

对柔性臂的扭转振动系统建模时,我们假定手臂对于 x 轴是对称的,而且质量均匀分布。再假定在 θ_h 的微小范围内手臂扭转刚性值 D 为恒定,于是手臂可以作为一维连续体进行处理。

系统的动能如下式所示:

$$K_T = \frac{1}{2} \left[I_H \dot{\theta}_H^2 + \rho J \int_0^l (\dot{\theta}_H + \dot{\theta}(x, t))^2 dx + I_p (\dot{\theta}_H + \dot{\theta}(l, t))^2 \right] \quad (2.534)$$

式中, ρ 及 J 分别为手臂的密度及截面 2 次矩; I_H 及 I_p 分别为关节刚体的惯性矩及重量块的惯性矩。由于该系统的势能仅考虑手臂的扭转弹性变形即可, 因此其可表示如下:

$$P_T = \frac{1}{2} D \int_0^l (\theta'(x, t))^2 dx \quad (2.535)$$

设驱动转矩为 $u(t)$, 则驱动器做的虚功 δW 为

$$\delta W = u(t) \delta \theta_H \quad (2.536)$$

根据式(2.534)~式(2.536), 利用哈密顿原理, 可以求出该系统的动态特性方程式和边界条件为

$$\begin{aligned} (I_H + \int_0^l \rho J dx + I_p) \ddot{\theta}_H + \int_0^l \rho J \ddot{\theta}(x, t) dx \\ + I_p \ddot{\theta}(l, t) = u \end{aligned} \quad (2.537)$$

$$\rho J (\ddot{\theta}_H + \ddot{\theta}(x, t)) - D \theta''(x, t) = 0 \quad (2.538)$$

$$\begin{aligned} I_p (\ddot{\theta}_H + \ddot{\theta}(l, t)) + D \theta'(l, t) = 0, \\ \theta'(0, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.539)$$

与弯曲振动系统情况类似, 使用动能及势能来定义函数 V , 并计算 V 对时间的微分, 则可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{\theta}_H \left[I_H \ddot{\theta}_H + \int_0^l \rho J (\ddot{\theta}_H + \ddot{\theta}(x, t)) dx \right. \\ \left. + I_p (\ddot{\theta}_H + \ddot{\theta}(l, t)) \right] + \int_0^l [\rho J (\ddot{\theta}_H \\ + \ddot{\theta}(x, t)) - D \theta''(x, t)] \dot{\theta}(x, t) dx \\ + [I_p (\ddot{\theta}_H + \ddot{\theta}(l, t)) + D \theta'(l, t)] \dot{\theta}(l, t) \\ - D \theta'(0, t) \dot{\theta}(0, t) = \dot{\theta}_H u \end{aligned} \quad (2.540)$$

在式(2.540)的求导过程中, 使用了式(2.537)~式(2.539)。由此可知, 与弯曲振动系统的情况相同, 在扭转振动系统中被动性也是成立的。

在以上准备工作的基础上, 我们基于约束模态法来建模。与弯曲振动类似, 可以将手臂的扭转角 $\theta(x, t)$ 分解为模态函数和时间函数, 即

$$\theta(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Psi_i(x) g_i(t) \quad (2.541)$$

式中, 模态函数 $\Psi_i(x)$ 根据式(2.538)及式

(2.539), 可满足以下的条件:

$$\rho J \omega^2 \Psi(x) + D \Psi''(x) = 0 \quad (2.542)$$

$$I_p \omega^2 \Psi(l) - D \Psi'(l) = 0, \Psi'(0) = 0 \quad (2.543)$$

式中, ω 根据下面的特征方程式来决定:

$$\frac{I_p \beta}{\rho J} \cos \beta l + \sin \beta l = 0, \beta^2 = \frac{\rho J}{D} \omega^2 \quad (2.544)$$

另外, 模态函数的正交条件为

$$\int_0^l \rho J \Psi_i(x) \Psi_j(x) dx + I_p \Psi_i(l) \Psi_j(l) = \delta_{ij} \quad (2.545)$$

根据这些条件, 求出模态函数, 再将式(2.541)代入式(2.537)~式(2.539)中, 则得到扭转振动系统的动态特性方程式如下:

$$\begin{aligned} I_T \ddot{\theta}_H + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_0^l \rho J \Psi_i(x) dx + I_p \Psi_i(l) \right] \\ \cdot \ddot{g}_i(t) = u \end{aligned} \quad (2.546)$$

$$\begin{aligned} \left[\int_0^l \rho J \Psi_i(x) dx + I_p \Psi_i(l) \right] \ddot{\theta}_H + \ddot{g}_i(t) \\ + \omega_i^2 g_i(t) = 0 \end{aligned} \quad (2.547)$$

其中,

$$I_T = I_H + \int_0^l \rho J dx + I_p$$

根据式(2.546)及式(2.547), 与弯曲振动系统的情况类似, 可以求出状态方程式。

3. 弯扭复合振动系统的建模和动态特性

在前面两个小节中, 将手臂的振动作为分别独立发生弯曲振动和扭转振动的情况, 对相应情况的动态特性方程进行了讨论。如果手臂截面的重心与剪切中心不重合, 那么将产生弯曲与扭转复合振动。机械手在搬运重物的时候, 如果重物质量不均匀, 或者其抓握的位置与重心偏离, 则都容易发生弯扭复合振动。由此可见, 弯扭复合振动系统的建模是很重要的。由于手臂的截面重心及剪切中心不一致而引起的复合振动建模在文献[7]中已有叙述。所以这里仅针对手臂抓握重物时重心不在手臂末端延长线上所导致的弯扭复合振动进行建模和说明。

在建模时, 有如下假定条件存在:

① 手臂未抓握重物时不发生弯扭复合振动。

② 手臂的截面形状、密度 ρ 、截面积 A 、弯曲刚性 EI 、扭转刚性 D 在整个手臂长度方向上是一定的。

③ 在弯曲振动中,对旋转惯性矩及剪切变形没有影响。

④ 弯曲振动仅在水平面内产生,不受重力的影响。

⑤ 振动发生在弹性变形范围内。

⑥ 关节的旋转轴只在铅垂方向上。

我们首先来求重物的重心在参考坐标系中的位置。从手臂末端位置来观察重物重心的位置时,为了简化问题,设定为 $[0 \ 0 \ z_p]$,于是重物的重心位置在参考坐标系中可以描述为

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_a \cos\theta + (z_p \eta(l, t) - y(l, t)) \sin\theta \\ l_a \sin\theta - (z_p \eta(l, t) - y(l, t)) \cos\theta \\ z_p \end{bmatrix} \quad (2.548)$$

式中, l_a 为从关节中心到手臂末端的距离; $\eta(l, t)$ 为手臂末端的扭转角。

若用式(2.548)来表示整个系统的动能 K_E , 则得到

$$\begin{aligned} K_E = & \frac{1}{2} \left\{ \rho A \int_0^l [(x + r_h)^2 \dot{\theta}^2 + \dot{y}(x, t)^2 \right. \\ & + y(x, t)^2 \dot{\theta}^2 + 2(x + r_h) \\ & \times \dot{y}(x, t) \dot{\theta}] dx + I_h \dot{\theta}^2 + m_p (\dot{X}_p^2 \\ & + \dot{Y}_p^2 + \dot{Z}_p^2) + I_{px} (\dot{\theta} + y'(l, t))^2 \\ & \left. + I_{pz} \dot{\eta}(l, t)^2 + \rho J \int_0^l \dot{\eta}(x, t)^2 dx \right\} \end{aligned} \quad (2.549)$$

式中, I_{px} 及 I_{pz} 分别为重物绕 x 轴和 z 轴的惯性矩

由式(2.548)可知,复合振动的影响仅表现在重物部分。

系统的势能 P_E 可描述如下:

$$\begin{aligned} P_E = & \frac{1}{2} \left[\int_0^l EI y''(x, t)^2 dx \right. \\ & \left. + \int_0^l D \eta'(x, t)^2 dx \right] \end{aligned} \quad (2.550)$$

设加在关节上的驱动转矩为 τ , 则驱动器做的虚功 δW 为

$$\delta W = \tau(t) \cdot \delta \theta \quad (2.551)$$

由式(2.549)~式(2.551),利用哈密顿原理,求出动态特性方程式和边界条件,如下式所示:

$$\begin{aligned} & \rho A \int_0^l [(x + r_h)^2 \ddot{\theta} + 2y(x, t) \\ & \cdot \dot{y}(x, t) \dot{\theta} + y(x, t)^2 \ddot{\theta} + (x + r_h) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \ddot{y}(x, t)] dx + I_h \ddot{\theta} + I_{pz} (\ddot{y}'(l, t) + \ddot{\theta}) \\ & + m_p [l_a^2 \ddot{\theta} + 2(y(l, t) - z_p \eta(l, t)) \\ & \cdot (\dot{y}(l, t) - z_p \dot{\eta}(l, t)) \dot{\theta} + (y(l, t) \\ & - z_p \eta(l, t))^2 \ddot{\theta} + l_a (\ddot{y}(l, t) - z_p \ddot{\eta}(l, t))] \\ & = \tau \end{aligned} \quad (2.552)$$

$$\begin{aligned} & \rho A [\ddot{y}(x, t) + (x + r_h) \ddot{\theta} - y(x, t) \dot{\theta}^2] \\ & + EI y''''(x, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.553)$$

$$\begin{aligned} & m_p [\ddot{y}(l, t) - z_p \ddot{\eta}(l, t) + l_a \ddot{\theta} - (y(l, t) \\ & - z_p \eta(l, t)) \dot{\theta}^2] - EI y'''(l, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.554)$$

$$\begin{aligned} & I_{px} [\ddot{y}'(l, t) + \ddot{\theta}] + EI y''(l, t) = 0 \\ & \quad \quad \quad (2.555) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \rho J \ddot{\eta}(x, t) - D \eta''(x, t) = 0 \quad (2.556) \\ & y(0, t) = y'(0, t) = 0, \eta(0, t) = 0 \\ & \quad \quad \quad (2.557) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & I_{px} \ddot{\eta}(l, t) - m_p z_p [\ddot{y}(l, t) - z_p \ddot{\eta}(l, t) + l_a \ddot{\theta} \\ & + \dot{\theta}^2 (y(l, t) - z_p \eta(l, t))] + D \eta'(l, t) = 0 \end{aligned} \quad (2.558)$$

与前两节类似,根据动能 K_E 和势能 P_E 来定义函数 V ,再计算时间微分,则能够证明在弯扭复合振动系统中被动性也是成立的。

根据式(2.552)~式(2.558),设手臂的振动是微振动,作线性化处理,假定弯曲振动及扭转振动以一个固有模态同步运动,按下式所示进行变量分解:

$$\begin{bmatrix} y(x, t) \\ \eta(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(x) \\ \Omega(x) \end{bmatrix} q(t) \quad (2.559)$$

这里我们利用约束模态法来求解方程式。(2.559)的模态函数满足下式的正交条件:

$$\begin{aligned} & \int_0^l [\rho A Y_i(x) Y_j(x) + \rho J \Omega_i(x) \Omega_j(x)] dx \\ & + m_p Y_i(l) Y_j(l) + I_{px} Y_i'(l) Y_j'(l) \\ & + m_p z_p^2 \Omega_i(l) \Omega_j(l) + I_{pz} \Omega_i(l) \Omega_j(l) \\ & - m_p z_p [Y_i(l) \Omega_j(l) - Y_j(l) \Omega_i(l)] = \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2.560)$$

利用式(2.559)进行模态展开,可求出弯扭复合振动系统的动态特性方程式如下:

$$\begin{aligned} & I_T \ddot{\theta} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\rho A \int_0^l (x + r_h) Y_i(x) dx \right. \\ & + I_{px} Y_i'(l) + m_p l_a Y_i(l) \\ & \left. - m_p z_p \Omega_i(l) \right] \ddot{q}_i(t) = \tau \end{aligned} \quad (2.561)$$

$$\begin{aligned} & \left[\rho A \int_0^l Y_j(x)(x+r_h)dx + I_{pz} Y_j'(l) \right. \\ & \quad \left. + m_p l_a - m_p z_p l_a \right] \ddot{\theta} + \ddot{q}_j(t) \\ & \quad + \omega_j^2 q_j(t) = 0 \end{aligned} \quad (2.562)$$

该动态特性方程式反映了弯曲与扭转复合振动的情况。人们在该复合振动系统模型的基础上可以实施控制。

4. n 运动链的建模及动态特性

前面我们得到了单杆件的结果。在本小节中我们将介绍将单杆件扩展为 n 运动链的方法。对于 n 运动链来说,描述具体的动态特性方程式将非常复杂,因此在这里我们仅仅介绍一下计算的步骤。多运动链手臂问题,可以在与单运动链同样假定条件的基础上进行动能和势能的计算,再根据拉格朗日方法或哈密顿原理,对一般的 n 运动链开展建模^[2,12,17,24]。如果是属于刚性运动链,为了描述运动,可以借助于 Denavit-Hartenberg 的齐次变换矩阵方法,不过不能将它原封不动地用于柔性臂。为了使该方法可以用于柔性臂,需要定义下列两个矩阵:

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 & 0 \\ \cos\alpha\sin\theta & \cos\alpha\cos\theta & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha\sin\theta & \sin\alpha\cos\theta & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.563)$$

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\theta_z & \delta\theta_y & 1 \\ \delta\theta_z & 1 & -\delta\theta_x & \delta_y \\ -\delta\theta_y & \delta\theta_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.564)$$

式中,矩阵 \mathbf{R}_i 为关节部分的旋转; θ 为绕 z 轴的旋转; α 为绕 x 轴的旋转。即 θ 为关节的旋转, α 表示在没有变形的状态下手臂的扭转。矩阵 \mathbf{E}_i 表示坐标原点的变换。 $\delta\theta_x$ 、 $\delta\theta_y$ 、 $\delta\theta_z$ 表示手臂变形产生的微旋转, δy 和 δz 为手臂变形产生的微弯曲。这里假定不产生纵向振动,并且不考虑 x 轴方向的弯曲。图 2.95 所示为 n 杆件的柔性臂的坐标系。

根据以上的情况, n 杆件柔性臂的从参考坐标系到第 n 杆件坐标系的变换矩阵为

$${}^0\mathbf{T}_n = \mathbf{R}_{f_{n1}} \mathbf{E}_{f1} \mathbf{R}_{f_{n2}} \mathbf{E}_{f2} \cdots \mathbf{R}_{f_{nn}} \mathbf{E}_{fn} \quad (2.565)$$

式中, $\mathbf{R}_{f_{ni}}$ 为使 \mathbf{R}_i 原点仅仅移动关节半径距离

的矩阵。利用 $\mathbf{R}_{f_{ni}}$,使坐标原点能移动到手臂(柔性体)与关节(刚体)的连接点上。

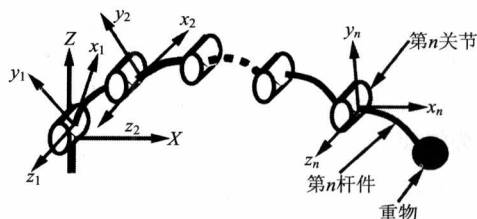


图 2.95 n 运动链的柔性臂坐标系

根据式(2.565),能够计算参考坐标系中各个杆件、关节、重物的位置及速度,以及动能和势能。

下面首先计算动能,第 i 个杆件的动能计算如下式所示:

$$K_{ai} = \frac{1}{2} \int_0^{l_i} d_{mai} \cdot \text{trace}(\dot{x}_{ai} \cdot \dot{x}_{ai}^T) dx_i \quad (2.566)$$

式中, d_{mai} 为第 i 个杆件微小部分的质量; x_{ai} 为第 i 个杆件的位置。

然后计算关节 i 的动能。关节 i 的角速度 ω_{ji} 可表示为

$$\omega_{ji} = \left(\prod_{i=1}^i \mathbf{C}_i \right)^{-1} \dot{\Psi}_0 + \left(\prod_{i=2}^i \mathbf{C}_i \right)^{-1} \dot{\Psi}_1 + \cdots + \mathbf{C}_i^{-1} \dot{\Psi}_i \quad (2.567)$$

式中, Ψ_0 、 Ψ_1 、 Ψ_i 分别为各个关节的角度; \mathbf{C}_i 是从 ${}^{i-1}\mathbf{T}_i$ 矩阵中取出的姿态变换(旋转部分)的 3×3 矩阵。然后,若设关节 i 的角动量为 L_i ,则动能 K_{ji} 及重物的动能 K_p 为:

$$K_{ji} = \frac{1}{2} [M_{ji} \cdot \text{trace}(v_{ji} \cdot v_{ji}^T) + L_i \cdot \omega_{ji}^i] \quad (2.568)$$

$$K_p = \frac{1}{2} [M_p \cdot \text{trace}(v_p \cdot v_p^T) + L_p \cdot \omega_p^i] \quad (2.569)$$

这样,根据式(2.566)、式(2.568)及式(2.569),能够求出整个系统的动能 K_E 。

接着求势能。柔性臂的势能分为重力具有的势能和手臂弹性变形具有的势能。首先,考虑弹性变形产生的势能。第 i 个杆件微变形产生的势能如下:

$$\begin{aligned} P_{Ei} = & \int_0^{l_i} [E_i I_{iz} (y_i''(x_i, t))^2 \\ & + E_i I_{iy} (z_i''(x_i, t))^2] dx_i \end{aligned}$$

$$+ G_i J_{pi} (\theta_{ix}'(x_i, t))^2 dx_i \quad (2.570)$$

式中, E_i 及 G_i 分别为第 i 个杆件的纵向弹性系数及横向弹性系数(与单运动链的情况一样); I_{ix} 及 I_{iy} 分别为绕 z 轴、 y 轴的截面 2 次矩; J_{pi} 为截面的 2 次极矩。

然后, 考虑重力产生的势能, 第 i 个杆件的势能如下:

$$P_{gai} = \int_0^{l_i} (-\rho_i A_i g \cdot x_{ai}) dx_i \quad (2.571)$$

各个关节重物的势能 P_{Gji} 及重物的势能 P_{GP} 也能够同样计算得到, 这样就能够求出整个系统的势能 P_E 。

拉格朗日函数 $L = K_E - P_E$ 的计算与单运动链的情况相同, 将手臂的弹性位移做变量分解, 利用拉格朗日方法能够求出动态特征方程式。

关于 n 运动链柔性臂的被动性的问题, 虽然借助于理想动态特性方程式无法加以证明, 但在使用虚拟关节近似了手臂的柔性后, 该模型的被动性可以被证明成立^[24]。

5. 柔性臂的逆动力学

在柔性臂中, 如果打算实施前馈控制, 以达到沿给出轨迹进行控制的目的, 就必须求解逆动力学问题, 这一点与刚性机械手的情况是相同的。两者不同的是, 柔性臂属于分布参数系统, 有无限多个自由度。所以, 在给出任意的轨迹或运动时, 难以求出产生这种运动的有限个关节驱动力。为此, 人们提出了许多解决的方法, 例如, 用静态平衡变形求解关节驱动力的方法、用假想刚体坐标系的方法等^[15, 16, 18~20]。

下面以图 2.96 所示的二维平面柔性臂为例加以说明^[18]。将柔性臂的运动方程式表示为

$$M(z)\ddot{z} + G(z, \dot{z}) = B\tau \quad (2.572)$$

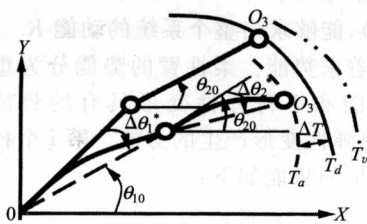


图 2.96 虚拟轨迹法

式中, $z = [\theta_1 \ \theta_2 \ q_1 \ q_2]^T$; $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$; M 为 4×4 矩阵; G 为 4×1 向量; B 为 4×2 矩阵。 θ_1 和 θ_2 为各个关节的旋转角, q_1 和 q_2 为各手臂的模态坐标, τ_1 和 τ_2 为各关节的转矩。由于末端的实际轨迹 T_a 偏离所希望的轨迹 T_d , 因此应该使其跟踪虚拟轨迹 T_v , 以达到与希望轨迹一致的目的。对于给出的轨迹 X_d, Y_d , 根据刚体模型的逆运动学, 求出解 $z_0 = [\theta_{10} \ \theta_{20} \ 0 \ 0]^T$ 。

若针对实际机器人的运动 z , 需要修正 Δz , 则有

$$z = z_0 + \Delta z \quad (2.573)$$

针对刚体模型中所用的输入转矩 τ_0 采用修正转矩 $\Delta \tau$, 则有

$$\tau = \tau_0 + \Delta \tau \quad (2.574)$$

将它们代入式(2.572)中, 并忽略高阶微变量不计, 可得下式:

$$M(z_0) \Delta \ddot{z} + C(z_0, \dot{z}_0) \Delta \dot{z} + K(z_0, \dot{z}_0, \ddot{z}_0) \Delta z = h(z_0, \dot{z}_0, \ddot{z}_0, \tau_0) + B \Delta \tau \quad (2.575)$$

若设 $\Delta \dot{z}$ 及 $\Delta \ddot{z}$ 产生的力能够忽略不计, 则有

$$K(z_0, \dot{z}_0, \ddot{z}_0) \Delta z = h(z_0, \dot{z}_0, \ddot{z}_0, \tau_0) \quad (2.576)$$

由此求出 $\Delta z = [\Delta \theta_1 \ \Delta \theta_2 \ q_1 \ q_2]^T$, 其结果应该将刚体运动的 θ_{10} 及 θ_{20} 修正为

$$\begin{aligned} \theta_1^* &= \theta_{10} - \left(\Delta \theta_1 + \frac{\phi_{L1} q_1}{L_1} \right) \\ \theta_2^* &= \theta_{20} - \left(\Delta \theta_2 + \frac{\phi_{L2} q_2}{L_2} + \phi'_{L1} q_1 \right) \end{aligned} \quad (2.577)$$

同时, 再次使用刚体模型来计算转矩, 并修正偏差。式(2.577)中, L_1 及 L_2 为手臂长度, $\phi_{L1} = \phi_1(L_1)$, $\phi_{L2} = \phi_2(L_2)$ 。该方法虽然在直观上比较容易理解, 但不一定能保证收敛性。

现在, 人们对柔性臂提出了各种求解逆动力学的方法, 但从严格意义上来说, 已经发表的研究报告都是基于虚拟刚体模型的柔性臂逆动力学^[19]。

荒川 淳 福田敏男

2.6.2 柔性臂的控制

所谓柔性臂(flexible arm), 是指手臂的质量很轻, 刚性非常低, 因此必须将之视为弹性体, 其振动第 1 阶模态一般低于数赫兹的程度。柔性臂运动时, 由于在电机旋转的同时, 手臂会产生振动, 因此必须同时对运动和

振动两者实施控制。

关于柔性臂的控制研究报告,最初发表于1975年,是一个关于双杆件、双关节系统的反馈控制的研究报告^[26]。

在1985年前后,基于控制理论,人们开展了单杆件柔性臂的运动和振动抑制控制系统的设计及实验验证^[27,28]。之后,有关柔性臂建模和控制的研究逐渐受到关注。日本机器人学会为此编辑出版了两集特刊^[29,30]。目前,人们已经把研究对象扩展到多杆件柔性臂,研究的任务也从最初的定位控制,扩大到有关力控制(force control)、协调控制(cooperative control)的研究。

作为柔性臂的控制方法大致分为两个流派:第一个流派称为基于有限元近似系统的控制系统设计法;第二个流派是基于分布参数模型(distributed parameter model)的李亚普诺夫方法(Lyapunov method),与第一个流派有所不同。

1. 振动抑制控制

1) 分布参数模型

研究对象选择一端固定在控制电机转轴上、另一端自由悬空的均匀单杆件柔性臂。设手臂的长度、线密度、杨氏模量、截面的2次矩分别为 L 、 ρ 、 E 、 I ,手臂的弹性位移为 $y(x, t)$,设电机的输入转矩、旋转角、转子的惯性矩分别为 $\tau(t)$ 、 $\theta(t)$ 、 J 。另外,忽略重力及摩擦力。电机有关的动能 K_e 、柔性臂有关的动能 K_w 及势能 P_w 为:

$$K_e = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2(t)$$

$$K_w = \frac{1}{2} \int_0^L \dot{y}(x, t) + x \dot{\theta}(t))^2 \rho dx$$

$$P_w = \frac{1}{2} \int_0^L EI (y''(x, t))^2 dx \quad (2.578)$$

利用哈密顿原理作变分计算,得到手臂振动方程式和电机振动方程式分别为^[28]

$$\ddot{y}(x, t) + \alpha y'''(x, t) = -x \ddot{\theta}(t) \quad (2.579)$$

$$y(0, t) = y'(0, t) = y''(L, t) = y'''(L, t) = 0 \quad (2.580)$$

$$J \ddot{\theta}(t) - EI y''(0, t) = \tau(t) \quad (2.581)$$

式中, $\alpha = EI/\rho$; (\cdot) 为对于时间的微分; $(\cdot)'$ 为对于空间变量 x 的微分。

2) 基于有限元近似系统的控制问题

基于柔性臂的精确模型,即分布参数模型构成控制系统时,随之而来的问题是分布参数系统(distributed parameter system)属于无限元系统,相反地,控制器却是有限元的。因此,人们经常采用的办法是将分布参数模型进行有限元化,即推导所谓有限元近似模型来完成控制系统的设计^[31,32]。

首先,我们对分布参数模型的有限元近似模型的推导过程加以说明。对于单杆件柔性臂的分布参数系统(式(2.579)和式(2.580)),由于不存在衰减项,因此开环系统的极点全部分布在虚轴上。由于基于有限元近似模型而设计的控制律难以使无限个极点稳定,因此通常需要考虑手臂的内部衰减(internal damping),采用如下述那样的系统:

$$\ddot{y}(x, t) + \delta \alpha y'''(x, t) + \alpha y''''(x, t) = -x u(t) \quad (2.582)$$

$$y(0, t) = y'(0, t) = y''(L, t) = y'''(L, t) = 0 \quad (2.583)$$

$$\ddot{\theta}(t) = u(t) \quad (2.584)$$

式中, $\delta (>0)$ 为内部衰减系数,利用手臂根部的变形,设输入转矩为 $\tau(t) = -EI y''(0, t) + J_u(t)$,将电机的角加速度 $\ddot{\theta}(t)$ 看作是系统的输入 $u(t)$ 。若电机角度、角速度、手臂根部的变形均可以被测量到,则系统的输出方程式为

$$Y(t) = [Y_1, Y_2, Y_3]^T = [\theta(t), \dot{\theta}(t), EI y''(0, t)]^T \quad (2.585)$$

在求解分布式参数系统(式(2.582)和(2.583))所对应的特征值问题时,它的解,即特征值(eigenvalue)和特征函数(eigenfunction)分别用 λ_j 、 $\phi_j(x)$ 表示,将手臂的弹性变形作特征函数展开^[28]得到

$$y(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_j} \phi_j(x) q_j(t) \quad (2.586)$$

于是柔性臂的振动模态方程式(mode equation)为

$$\ddot{q}_i(t) + \delta \lambda_i \dot{q}_i(t) + \lambda_i q_i(t) = b_i u(t) \quad (2.587)$$

式中,设电机系统的状态变量(刚体模态)和振动系统的第1阶模态至第 n 阶模态为控制

模态(control mode),而第 $n+1$ 阶后的为剩余模态(residual mode),若将状态向量分别取为 $x_r = [\theta(t), \dot{\theta}(t)]^T$, $x_1 = [q_1(t), \dot{q}_1(t), \dots, q_n(t), \dot{q}_n(t)]^T$, $x_2 = [q_{n+1}(t), \dot{q}_{n+1}(t), \dots]^T$, 则分布参数系统可改写为如下式所示的集中参数系统(lumped parameter system):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_r \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (2.588)$$

$$Y = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.589)$$

在系统(式(2.588)及式(2.589))中,由于 (A_r, B_r) 是可控的, A_1 及 A_2 为稳定矩阵,因此刚性模态的PD控制

$$u = K_r x_r \quad (2.590)$$

的振动模态的稳定度维持原样,能够自由配置刚性模态的极点。但是,由于衰减系数 δ 小,一般希望振动模态能更快速地衰减。考虑控制模态的状态反馈为

$$u = K_r x_r + K_1 x_1 \quad (2.591)$$

该状态反馈律对应的闭环系统为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r + B_r K_r & B_r K_1 & 0 \\ B_1 K_r & A_1 + B_1 K_1 & 0 \\ B_2 K_r & B_2 K_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

剩余模态产生的影响,即与 $B_2 K_r$ 及 $B_2 K_1$ 有关的项被称为控制溢出(control spillover)。在这里,如果控制模态是可控的,则可将剩余模态的稳定性维持不动,然后指定控制模态的稳定度。

但是,由于在控制模态中能够直接测量的项仅有刚性模态 x_r ,因此必须预测与想要控制的振动模态有关的状态 x_1 。

状态观测器按下式构成:

$$\dot{z}_1 = A_1 z_1 + G_1 (Y_3 - C_1 z_1) + B_1 u \quad (2.592)$$

设控制律为

$$u = K_r x_r + K_1 z_1 \quad (2.593)$$

若定义 $e = x_1 - z_1$, 则闭环系统为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{e} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r + B_r K_r & -B_r K_1 & 0 \\ 0 & A_1 - G_1 C_1 & A_1 + B_1 K_1 \\ B_1 K_r & -B_1 K_1 & A_1 + B_1 K_1 \\ B_2 K_r & -B_2 K_1 & B_2 K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -G_1 C_2 \\ 0 \\ 0 \\ A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ e \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

剩余模态产生的影响,即与 $G_1 C_2$ 有关的项被称为观测溢出(observation spillover)。由于受观测溢出的影响,闭环系统的稳定性无法得到保证。因此,进行控制系统设计时必须考虑到剩余模态的因素。

3) 基于有限元近似模型的控制系统设计

近年来,控制理论和计算机技术得到迅速发展,目前只要给出模型,设计相应的控制系统应该不成问题。但是,柔性臂的情况有所不同,因为它原本属于无限元系统(分布参数系统),必须考虑剩余模态和参数的不确定性(parameter uncertainty)在建模时带来的误差(modeling error),这将导致在控制方面的困难。

(1) 具有高频截止特性的最佳调节器

必须降低输入的高频区域的增益,以便防止激励在控制系统设计阶段被忽略的剩余模态,杜绝控制溢出的不稳定性。为了保持控制频带区域原有的性能不变,确保对于剩余模态的鲁棒稳定性,可以在控制器输出与系统输入之间插入低通滤波器^[33]。另外,在构成使用系统的输出量的状态观测器时,为了抑制由输出中的剩余模态造成观测溢出,也应该在系统的输出与控制器的输入之间插入低通滤波器,来降低输入在高频区域的增益。对于上述由两种滤波器和控制模态组成的综合扩大系统,如果一般2次型评价函数的最小问题有解,那么就有可能设计出具有高频截止特性的最佳调节器^[33]。也有人指出,由于无法直接测量构成最佳调节器所必需的状态量,因此需要另外构成状态观测器^[32]。

(2) H_∞ 控制 如果是具有高频截止特性的最佳调节器,那么它能起到补偿溢出不稳定性,同时对运动及振动进行控制的作用,使控制性能得到改善。但如果此时物理参数具有不确定性,导致控制模态中有建模误差,或者存在着外部干扰等不确定因素的话,则闭环系统有可能不稳定。因此,必须针对剩余模态和这些不确定因素设计专门的鲁棒控制系统(robust control system)。未考虑剩余

模态和参数不确定性的标准模型 (nominal model) 与不确定性相加构成实际控制对象, 它可以表示为

$$P(s) = P_0(s) + \Delta(s) \quad (2.594)$$

为了限定相加的扰动 $\Delta(s)$ 的大小, 应该限制上限为

$$|\Delta(j\omega)| < |W(j\omega)|, \text{ 由于 } \forall \omega \in [0, \infty) \quad (2.595)$$

它与频率有关。式(2.595)中, $W(s)$ 为已知的稳定且相位最小的传递函数。将式(2.594)改写为下式:

$$P(s) = P_0(s) + W(s)\bar{\Delta}(s) \quad (2.596)$$

虽然 P_0 是稳定的, 但极点过于接近虚轴, 最好让它们向增加稳定度的方向移动。假设让虚轴向左移动, 对具有不稳定极点的假想系统采用鲁棒稳定方法, 则闭环系统能够相应于移动量增加一定的稳定度, 改善其响应性。即对于某个 $\beta > 0$, 考虑

$$P(s) = P_0(s - \beta) + W(s - \beta)\bar{\Delta}(s) \quad (2.597)$$

若该系统存在鲁棒稳定器 $\bar{K}(s)$, 采用 $K(s) = \bar{K}(s + \beta)$ 作为控制器的闭环系统的实部, 它将小于 $-\beta$ 。该方法被称为鲁棒稳定度指定法^[34] (robust stability degree assignment)。另外, 在这种场合也经常采用混合灵敏度设计, 它的评价函数不仅包含鲁棒稳定性, 而且还综合了其他各种指标, 以力求达到这些指标的折中为目的。

我们也许认为, 上述控制系统设计方法考虑的因素已经十分周到了。但实际上, 这些控制系统仍然存在以下问题。

具有高频截止特性的最佳调节器^[33]和 H_∞ 控制理论^[35] 的鲁棒控制在理论上并不能保证无限元系统构成的闭环系统的稳定性^[32]。即使我们能够评价建模的误差, 也是过于保守, 也有可能造成控制性能的明显恶化。一般来说, 这些控制器的阶数都比较高, 结构比较复杂^[36]。另外, 如果系统未假定内部衰减, 就无法保证闭环系统的渐近稳定性。

另外, 有人还提出采用适合多杆件柔性臂的奇异摄动法 (singular perturbation method), 该方法将系统分解为快速模态和慢速模态, 并对它实施复合控制 (composite control)^[37]。但该方法适用于非常接近刚体的柔

性臂, 不能保证对于建模误差的鲁棒性。还有人提出另外的方法^[38], 将输入的目标值进行整形, 使手臂尽量不产生振动, 但缺点是仍然无法保证鲁棒性。

4) 基于分布参数系统的控制系统设计

下面介绍解决分布参数系统控制问题的李亚普诺夫控制方法。这里要注意的是, 由于 $\delta = 0$, 因此闭环系统的无限个极点全部分布在虚轴上。将李亚普诺夫函数的候补 V_1 定义为

$$V_1 = c_1 K_\theta + c_2 (K_w + P_w) + \frac{c_3}{2} [\theta(t) - \theta_d]^2 \quad (2.598)$$

式中, $c_1, c_2, c_3 > 0$, θ_d 为电机角度 θ 的参数目标值。沿着系统轨迹的 V_1 对时间的微分为

$$\dot{V}_1 = \dot{\theta} [c_1 \tau + (c_1 - c_2) E I y''(0, t) + c_3 (\theta - \theta_d)] \quad (2.599)$$

式中, 设 $c_4 > 0$, $k_p = c_3/c_1$, $k_d = c_4/c_1$, $k_s = -1 + (c_2/c_1)$, 若设输入转矩为

$$\tau(t) = -k_p (\theta(t) - \theta_d) - k_d \dot{\theta}(t) + k_s E I y''(0, t) \quad (2.600)$$

则 \dot{V}_1 为

$$\dot{V}_1 = -c_4 \dot{\theta}^2(t) \leq 0 \quad (2.601)$$

可以确认 V_1 为李亚普诺夫函数。再有, 根据不变性原理^[39] 能证明闭环系统的渐近稳定性。上面导出的控制律 (式(2.600)) 是电机角度 (P)、角速度 (D)、手臂根部变形 (strain) 的传感器输出的直接反馈 (PDS 控制), $\theta(t)$ 和 $\dot{\theta}(t)$ 能够用编码器进行测量, $y''(0, t)$ 能够用贴在手臂根部的应变片进行测量, 安装也很方便。控制系统在设计时不需要系统模型和物理参数, 控制器对于参数的不确定性具有鲁棒性。另外, 变形反馈增益为 $-1 < k_s < \infty$, 设 $c_1 > c_2$ (电机能量的权重大于手臂能量的权重) 时, $-1 < k_s < 0$, 不能期待产生振动抑制的效果。反之, 设 $c_1 < c_2$ 时, $k_s > 0$, 便能够期待产生振动抑制的效果。值得注意的是, 上面的控制系统也包含 PD 控制 (设 $c_1 = c_2$ 时, 为 $k_s = 0$), 是能保证渐近稳定性的。

另外, 有的研究报告指出, 把双杆件柔性臂视为复杂非线性分布参数系统进行建模, 利用李亚普诺夫方法也能推导出 PDS 控制律^[40]。

2. 力控制

有关与环境发生接触的柔性臂的力控制的研究,人们同样将其分成基于有限元近似模型的控制系统^[41]和基于分布参数模型的控制系统(不依据有限元近似)的两种设计方法。

1) 分布参数模型

单杆件柔性臂末端受到环境约束时,必须满足以下的约束条件:

$$\begin{aligned} \phi(\theta(t), y(L, t)) \\ = L \sin \theta(t) - y(L, t) \cos \theta(t) = 0 \end{aligned} \quad (2.602)$$

设拉格朗日乘数为 λ ,定义 $y_e(t) = y(L, t)$,则得到运动方程式

$$\begin{aligned} J \ddot{\theta}(t) + EI y''(0, t) \\ = \tau(t) + \lambda(t) \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \lambda(t) \frac{\partial \phi}{\partial y_e} L \\ \ddot{y}(x, t) + \delta \frac{EI}{\rho} y''''(x, t) + \frac{EI}{\rho} y''''(x, t) \\ = x \ddot{\theta}(t) \\ y(0, t) = 0, y'(0, t) = 0, y''(L, t) = 0 \\ EI y'''(L, t) = -\lambda(t) \frac{\partial \phi}{\partial y_e} \end{aligned} \quad (2.603)$$

这里,设

$$\begin{aligned} f(t) &= -\lambda \frac{\partial \phi}{\partial y_e} \\ v(x, t) &= y(x, t) \\ &\quad - f(t) \left(-\frac{L}{2EI} x^2 + \frac{1}{6EI} x^3 \right) \end{aligned} \quad (2.604)$$

将边界条件齐次化后,得到

$$\begin{aligned} \ddot{v}(x, t) + \delta \frac{EI}{\rho} v''''(x, t) + \frac{EI}{\rho} v''''(x, t) \\ + f(t) \left(-\frac{L}{2EI} x^2 + \frac{1}{6EI} x^3 \right) = x \ddot{\theta}(t) \end{aligned} \quad (2.605)$$

$$\begin{aligned} v(0, t) = 0, v'(0, t) = 0, v''(L, t) = 0, \\ v'''(L, t) = 0 \end{aligned}$$

2) 基于有限元近似模型的控制系统设计
取与式(2.605)相对应的固有值问题的解,即特征值 γ_i ,借助于特征函数 $\phi_i(x)$,类似式(2.586),将 $v(x, t)$ 展开,再设电机角加速度为系统的输入 $\ddot{\theta}(t) = u(t)$,于是手臂振动模态方程式为

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) &= -\delta \gamma_i \dot{q}_i(t) - \gamma_i q_i(t) - d_i \ddot{f}(t) \\ &\quad + b_i u(t) \end{aligned} \quad (2.606)$$

在约束条件(式(2.602))中,考虑到振动的 N 阶模态,用 $\theta \approx 0$,则得到

$$L \theta(t) - \sum_{j=1}^N \frac{\phi_j(L)}{\gamma_j} q_j(t) + \frac{L^3}{3EI} f(t) = 0 \quad (2.607)$$

若将式(2.606)代入式(2.607)中消去 $f(t)$,则得到状态方程式

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.608)$$

式中, $x = [x_1^T, x_2^T]^T$, $x_1 = [\theta - \theta_d, \dot{\theta}]^T$, $x_2 = [q_1, \dot{q}_1, \dots, q_N, \dot{q}_N]^T$ 。 θ_d 为与目标约束力 f_d 相对应的角度 θ 的目标值,根据约束条件有下式成立:

$$\theta_d = -\frac{L^2}{3EI} f_d, f_d = -f_{nd} \quad (2.609)$$

再因为 $v''(0, t) = y''(0, t) + (L/EI)f(t)$,该量值可以由力传感器和应变片的输出求算,故输出方程式可以表达为

$$Y(t) = [\theta(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad v''(0, t)]^T = Cx(t) \quad (2.610)$$

由于可以推导出有限元近似模型,因此采用高频截止特性的最佳调节器或 H_∞ 控制理论设计鲁棒控制系统也就成为可能^[41]。此外还有人基于有限元近似模型对柔性臂力反馈控制的不稳定性进行了研究^[42,43]。基于分布参数模型,根据李亚普诺夫方法还可以推导 PDS 力控制律,因为该步骤与协调控制的情况相同,因此请参考下一小节的内容。

3. 协调控制

1) 分布参数模型

下面说明单杆件双臂柔性臂的协调控制^[44],臂的柔性杆件 $i(i=1,2)$ 的参数采用在单独手臂参数的基础上附加下角标 i 表示的方式。另外,设手臂抓握的物体质量为 M_{ob} 。由于各个手臂末端固定在刚体负载上,因此必须满足下面的约束条件:

$$\phi = L\theta_1(t) - L\theta_2(t) - y_{1e}(t) + y_{2e}(t) = 0 \quad (2.611)$$

设拉格朗日乘数为 λ ,于是得到以下的运动方程式:

电机 i 的旋转方程式为

$$J_i \ddot{\theta}_i(t) + E_i I_i y_i''(0, t) = \tau_i(t) \quad (2.612)$$

手臂 i 的振动方程式为

$$\ddot{y}_i(x, t) + \frac{E_i I_i}{\rho_i} y_i''''(x, t) = x_i \ddot{\theta}_i(t)$$

$$y_i(0, t) = 0, y_i'(0, t) = 0, y_i''(L, t) = 0 \quad (2.613)$$

$$E_i I_i \left[\frac{M_{ob}}{2\rho_i} y_i''''(L, t) + y_i'''(L, t) \right] \\ = (-1)^{i+1} \lambda(t)$$

2) 基于分布参数系统的控制系统设计

设目标抓握力 λ_d 对应的电机 i 的目标角度为 θ_{id} , 柔性臂的目标稳定变形为 $y_{id}(x_i)$, k_{ai} 、 k_b 、 k_{pi} 为正常数, 定义如下函数:

$$V = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{1}{2} k_{ai} J_i \dot{\theta}_i^2(t) + \frac{1}{2} k_{pi} (\theta_i(t) - \theta_{id})^2 \right. \\ + k_b \left[\frac{1}{2} \int_0^L \rho_i (\dot{y}_i(x_i, t) - x_i \dot{\theta}_i(t))^2 dx_i \right. \\ + \frac{1}{4} M_{ob} (\dot{y}_{ie}(t) - L \dot{\theta}_i(t))^2 \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \int_0^L E_i I_i (y_i''(x_i, t) - y_{id}''(x_i))^2 dx_i \right] \right\} \quad (2.614)$$

设输入转矩 τ_i 为:

$$\tau_i(t) = - \{ k_{pi} [\theta_i(t) - \theta_{id}] + k_{di} \dot{\theta}_i(t) \\ + k_{si} E_i I_i [y_i''(0, t) - y_{id}''(0)] \\ + E_i I_i y_{id}''(0) \} \quad (2.615)$$

则有

$$\frac{dV}{dt} = - \sum_{i=1}^2 k_{di} \dot{\theta}_i^2(t) \leq 0 \quad (2.616)$$

式中, V 为李亚普诺夫函数。若采用不变性原理, 可以证明闭环系统的渐近稳定性。式(2.616)中, $k_{di} > 0$, $k_{pi} = k_{ai}/k_{si}$, $k_{si} = (k_b - k_{ai})/k_{ai}$ 。另外, 我们还应该注意有以下关系成立:

$$\theta_{1d} = \frac{-L^2}{3E_2 I_2} \lambda_d, \quad \theta_{2d} = \frac{L^2}{3E_1 I_1} \lambda_d$$

$$y_{id}(x_i) = (-1)^i \frac{1}{6E_i I_i} \lambda_d (-3Lx_i^2 + x_i^3)$$

在控制律(式(2.615))中, 若 $k_b = k_{ai}$, 各轴为PD控制; 在 $k_b \neq k_{ai}$ 时, 各轴为PDS控制。

如上可知, 人们根据柔性臂的力学本质, 对动力学最佳控制提出了实施方案^[45]。

松野文俊

2.7 控制理论的应用

2.7.1 自适应控制

在本小节中, 将叙述一般的自适应控制(adaptive control)的方法^[1~3], 并针对如何利用机械系统独特的性质来实现自适应控制作简要的介绍。然后, 举一些机器人系统实施

自适应控制应用的例子。

1. 自适应控制概要

我们知道, 如果能掌握控制对象的模型, 那么就能够根据模型设计出控制律。但是, 实际上很少有完全已知控制对象模型的情况, 总包含某种不确定性。自适应控制就是针对这样一些场合提出的一种控制策略。具体来说, 该方法是假设控制对象的模型中包含未知(或不确定)参数, 在控制中一面实时地推测这些参数的值, 一面实施控制律。

如图2.97所示, 自适应控制方法大致可以分为三类。

1) 自校正控制系统(self tuning control system)(图2.97(a))

该方法根据可测量的输入、输出信号来辨识控制对象的未知参数, 并依靠这些值完成控制器的参数调整。总之, 是将实时辨识与通常的控制律设计(根据控制对象的参数来计算控制律)组合起来的方法。由于进行实时辨识及控制律的设计需要时间(一般计算量大), 因此它适用于时间常数较大的控制过程, 如化学工业的对象。

2) 模型参考自适应控制系统(model reference adaptive control system)(图2.97(b))

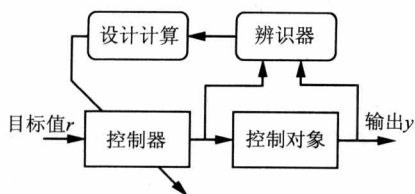
该方法以参考模型的形式给出对控制对象的特性所期望的标准。然后, 对控制对象和参考模型给出相同的目标值, 借助于控制器中可调整参数的调节功能, 达到两者输出的一致。这是自适应控制理论中在理论上最完备的一种方法。

3) 增益定序控制系统(gain scheduling control system)[图2.97(c)]。

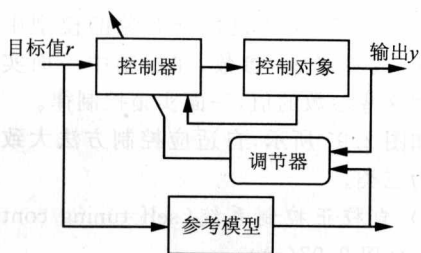
该方法针对动态特性随环境变化的控制对象, 通过某种方法获得环境变化的信息, 然后由此来调整控制器的参数。经常见到的例子可以举出飞机的控制。飞机的飞行特性是随高度的变化而变化的, 因此通常的办法是将控制器作为高度的函数, 并根据高度来调整控制器。

2. 机械系统自适应控制的基础理论

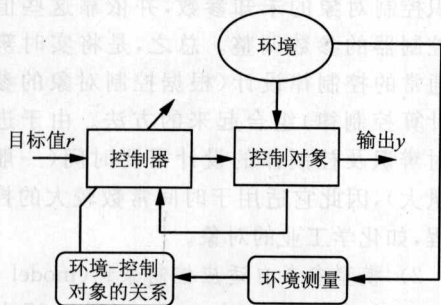
机械手等属于 n 输入 n 关节机械系统的运动方程式一般需要用复杂的非线性微分方程式来表示



(a) 自校正控制系统



(b) 模型参考自适应控制系统



(c) 增益定序控制系统

图 2.97 自适应控制的方法分类

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + g(q) = u \quad (2.617)$$

式中, q 为 n 维关节向量; $M(q)$ 为 $n \times n$ 惯性矩阵; $c(q, \dot{q})\dot{q}$ 为 n 维离心力和哥氏力项; $B = \text{diag}[b_1, \dots, b_n]$ 为 $n \times n$ 的黏性摩擦系数矩阵; $g(q)$ 为 n 维重力项向量; u 为 n 维关节驱动转矩向量。

由于机械系统是非线性的, 因此如果原封不动地照搬传统处理线性系统的自适应控制方法, 可能难以完成它的控制要求。

一般认为是 Dubowsky 等^[4]最早开展了关于机械手的模型参考自适应控制系统研究。他们按照两点立场来设计自适应控制系统: ①将机械手运动方程式看作是线性系统; ②由于非线性效果造成线性化模型参数发生变化, 因此需要实施自适应控制。但是, 他们未研究如何保证整个控制系统稳定性的问

题。后来竹恒等^[5]提出了基于包含目标轨迹加速度信息在内的 PD 控制的自适应控制律。在该方法中, 虽然目标轨迹周围的线性近似系统的稳定性得到了保证, 但无法严格保证原非线性系统的稳定性。

在 20 世纪 80 年代中期以后, 人们开始意识到机械系统具有某些特殊性质。例如有:

性质 1 机械手的运动方程式虽然属于非线性, 但能满足匹配条件(matching condition)。即由于输入本身所具有的特点, 所有的非线性项几乎都能够被忽略。

性质 2 虽然机械手的运动方程式是非线性的, 但对于某些物理参数(不包括长度等几何学参数)而言却是线性的。即可以改写为^[6,7]

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\alpha = u \quad (2.618)$$

式中, $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 为仅由与几何学参数和运动数据有关的非线性函数构成的矩阵, 称为回归量(regressor); α 为将适当的物理参数排列的向量。这些参数被统称为基底参数(base parameter)^[6]。

性质 3 机械手的惯性矩阵与离心力项、哥氏力项之间有下列关系成立:

$$c(q, \dot{q})\dot{q} = \left[\frac{1}{2} \dot{M}(q) + S(q, \dot{q}) \right] \dot{q} \quad (2.619)$$

$$S(q, \dot{q})\dot{q} = \frac{1}{2} \left\{ \dot{M}(q)\dot{q} - \left[\frac{\partial}{\partial q} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \right]^T \right\} \quad (2.620)$$

矩阵 $S(q, \dot{q})$ 称为变形对称矩阵, 即对于任意的 n 维向量有^[8]

$$x^T S(q, \dot{q}) x = 0 \quad (2.621)$$

性质 4 若设机械手的输入为 u , 输出为 \dot{q} , 则输入、输出的关系为被动的(passive)。即在任意时刻 t 下式都成立:

$$\int_0^t \dot{q}^T(\tau) u(\tau) d\tau \geq -\gamma_0^2 \quad (2.622)$$

式中, γ_0 为仅取决于机械手的初始条件 $[q(0), \dot{q}(0)]$ 所决定的常数^[10]。

在这些性质中, 特别是性质 4, 是不仅对于刚性机械手, 即使杆件为柔性的杆件也成立的一个非常重要的性质^[10]。

下面考虑二阶微分是有界的目标轨迹 $q_d(t)$, 有下式成立:

$$M(q_d)\ddot{q}_d + c(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + B\dot{q}_d + g(q_d) = u_d \quad (2.623)$$

然后,考虑控制律

$$u = v - K_D y \quad (2.624)$$

式中, v 为适当的外部输入,并且有

$$y = \dot{e} + \lambda S_{\text{sat}}(e) \quad (2.625)$$

$$e = q - q_d \quad (2.626)$$

$$S_{\text{sat}}(e) = \begin{cases} e + 1 - \pi/2 & (e \geq \pi/2) \\ 1 - \cos e & (|e| < \pi/2) \\ -e + 1 - \pi/2 & (e \leq -\pi/2) \end{cases} \quad (2.627)$$

式中, λ 为适当的正常数。若将式(2.624)代入式(2.617)中的 u , 则有

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + g(q) + K_D y = v \quad (2.628)$$

这里,若取式(2.623)和式(2.628)的两边之差,便得到下式的偏差系统:

$$M(q)\ddot{e} + c(q, \dot{q})\dot{e} + K_D y + h(e, \dot{e}) = \Delta u \quad (2.629)$$

其中,

$$\Delta u = v - u_d$$

$$h(e, \dot{e}) = [M(q_d + e) - M(q_d)]\ddot{q}_d + [c(q_d + e, \dot{q}_d + \dot{e}) - c(q_d, \dot{q}_d)]\dot{q}_d + g(q_d + e) - g(q_d) \quad (2.630)$$

此时,下述的性质成立。

性质5 对于偏差系统(式(2.629)),若适当选择 λ, B, K_D , 则从输入 Δu 对于输出 y 的输入、输出关系满足输出耗散性(output dissipativeness)^[9], 即满足下式:

$$\int_0^t y^T(\tau) \Delta u(\tau) d\tau \geq V(t) - V(0) + \frac{k_0}{2} \int_0^t \|y(\tau)\|^2 d\tau \quad (2.631)$$

式中, $V(t)$ 为适当规定的正定值函数; k_0 为正常数。

了解了这些性质之后,人们提出了有关它们的自适应控制方法。原则上,根据性质1,若完全已知机械手的模型,那么就可以采用非线性补偿方式(利用输入忽略机械手运动方程式中的所有非线性项,对其进行线性化处理,然后设计线性控制律)。但是,如果杆件质量等物理参数不确定,那么是无法达到完全的非线性补偿的。下述的方法是基于

一面推测不确定参数,一面进行线性补偿的方法。

首先,在同一时期,大须贺^[11]和 Craig 等^[12]提出了利用性质2的非线性自适应控制律。这两个方案大体上相似,都是最早提出的不采用线性近似而保证控制系统稳定性的自适应控制方案。但是,两者都存在着必须依赖角加速度信息的问题。

后来,Slotine 等巧妙地利用性质3,提出非线性自适应控制律。他们的方法既不需要角加速度信息,也不作线性近似,就能够满足稳定性的要求。这就意味着,它必将会成为其后机械系统自适应控制的基本方法。下面我们对此进行简单说明,首先介绍结果。

结果1 考虑与机械手(式(2.617))及关节有关的目标轨迹 $q_d(t)$ 。设参数 α 未知(除此以外为已知)。这时,若自适应控制律为

$$u = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) \hat{\alpha} - K_D s \quad (2.632)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)^T s \quad (2.633)$$

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) \alpha = M(q)\ddot{q}_r + c(q, \dot{q})\dot{q}_r + g(q) \quad (2.634)$$

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e \quad (2.635)$$

$$s = \dot{e} + \Lambda e \quad (2.636)$$

$$e = q - q_d \quad (2.637)$$

于是得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q_d(t) \quad (2.638)$$

式中,设 Γ, Λ, K_D 全部为正定矩阵。

简单证明 在证明之前,先来看一看上述控制律的物理意义。控制律(式(2.632))的作用是非线性补偿和PD控制。然后,用式(2.633)来进行 α 的估计。由式(2.635)~式(2.637)可知, \ddot{q}_r 不是角加速度,而是由角度和角速度构成的信号。即为了实现本控制律,只要能够测量出关节角度和角速度信号即可。

下面借助于李亚普诺夫方法加以证明,具体来说,首先考虑正定值函数

$$V = \frac{1}{2} [s^T M(q)s + \alpha_e^T \Gamma \alpha_e] \quad (2.639)$$

将它沿着机械手与控制律合二为一的闭环系统进行时间微分。式中, α_e 为参数的估计误差,它被定义为

$$\alpha_e = \hat{\alpha} - \alpha \quad (2.640)$$

实际上,若计算时间微分,则有

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= s^T \mathbf{M}(q) \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{\mathbf{M}}(q) s + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \\ &= s^T \mathbf{M}(q) \ddot{q} - s^T \mathbf{M}(q) \ddot{q}_r \\ &\quad + \frac{1}{2} s^T \dot{\mathbf{M}}(q) s + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \quad (2.641)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= s^T \left\{ - \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{M}}(q) + \mathbf{S}(q, \dot{q}) \right] \dot{q} \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{g}(q) + \mathbf{u} \right\} - s^T \mathbf{M}(q) \ddot{q}_r \\ &\quad + \frac{1}{2} s^T \dot{\mathbf{M}}(q) s + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \quad (2.642)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= s^T \left\{ - \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{M}}(q) + \mathbf{S}(q, \dot{q}) \right] (s + \dot{q}_r) \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{g}(q) + \mathbf{u} \right\} - s^T \mathbf{M}(q) \ddot{q}_r \\ &\quad + \frac{1}{2} s^T \dot{\mathbf{M}}(q) s + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \quad (2.643)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= s^T \left\{ \mathbf{u} - \dot{\mathbf{M}}(q) \ddot{q}_r - \left[\frac{1}{2} \dot{\mathbf{M}}(q) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \mathbf{S}(q, \dot{q}) \right] \dot{q}_r - \mathbf{g}(q) \right\} + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \\ &\quad (2.644)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= s^T [\mathbf{u} - \mathbf{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) \alpha] + \dot{\alpha}_e^T \Gamma \alpha_e \\ &\quad (2.645)\end{aligned}$$

式中,从式(2.641)变为式(2.642)时用到式(2.617);从式(2.642)变为式(2.643)时用到式(2.635)~式(2.637);从式(2.643)变为式(2.644)时用到式(2.621);从式(2.644)变为式(2.645)时用到式(2.618)、式(2.629)、式(2.634)。

若像式(2.632)及(2.633)那样选择输入和参数估计律,则式(2.645)可以进一步改写为

$$\dot{V}(t) = -s^T \mathbf{K}_D s \leq 0 \quad (2.646)$$

据此可知,若 $s \rightarrow 0$,根据式(2.636),其结果有 $e \rightarrow 0$ 。即得到式(2.638)。

但是,控制律(式(2.612)~式(2.637))必须实时计算 $\mathbf{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r)$ 。它的计算量几乎与逆动力学问题具有相同的程度。反之,如果根据给定的目标轨迹 q_d 及其时间微分 \dot{q}_d 和 \ddot{q}_d ,能够离线计算 $\mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)$ 的话,就能够大幅度地减少所需的实时计算量,这样就能够体现出它具有的巨大的优越性。

这样就能得到下述的肯定结果^[9]。

结果2 考虑与机械手(式(2.617))及关节有关的目标轨迹 $q_d(t)$ 。设参数 α 为未知

(除此以外为已知)。这时,自适应控制律为

$$\mathbf{u} = \mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \hat{\alpha} - \mathbf{K}_D y \quad (2.647)$$

$$\hat{\alpha} = -\Gamma^{-1} \mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)^T y \quad (2.648)$$

$$y = e + \lambda S_{\text{sat}}(e) \quad (2.649)$$

$$e = q - q_d \quad (2.650)$$

式中,设 $\Gamma, \mathbf{A}, \mathbf{K}_D$ 全部为正定矩阵; λ 为正常数, $S_{\text{sat}}(e)$ 为用式(2.629)定义的饱和函数。这时,若选择 \mathbf{K}_D 及 λ ,使得性质4被满足,则得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q_d(t) \quad (2.651)$$

简要证明 整个系统的稳定性用性质5(偏差系统的输出耗散性)来表示。将式(2.647)代入式(2.617)中,得到

$$\begin{aligned}&\mathbf{M}(q) \ddot{e} + \mathbf{c}(q, \dot{q}) \dot{e} + \mathbf{K}_D y + \mathbf{h}(e, \dot{e}) \\ &\quad - \mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \alpha_e = 0 \quad (2.652)\end{aligned}$$

式中, $\alpha_e = \hat{\alpha} - \alpha$ 。因此,若取式(2.652)的两边与 y 的内积(利用式(2.631),设 $v=0$),则得到

$$\begin{aligned}&\frac{d}{dt} V + \frac{k_0}{2} \|y\|^2 - y^T \mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \alpha_e \leq 0 \\ &\quad (2.653)\end{aligned}$$

然而,由于

$$\begin{aligned}&\dot{\alpha}_e = \dot{\hat{\alpha}} - \dot{\alpha} = \dot{\hat{\alpha}} \\ &\quad = -\Gamma^{-1} \mathbf{Y}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d)^T y \quad (2.654)\end{aligned}$$

因此根据式(2.653),下式成立:

$$\frac{d}{dt} \left(V + \frac{1}{2} \alpha_e^T \Gamma \alpha_e \right) \leq \frac{k_0}{2} \|y\|^2 \quad (2.655)$$

因而, $y \in L^2(0, \infty)$, 结果如式(2.651)所示。详细内容请参阅文献[9]。

除了本小节所介绍的用法以外,研究人员还提出了机械手的许多其他自适应控制方法,不过基本上,性质1~性质5都起到了重要的作用。

3. 机械系统的自适应鲁棒控制

在本节2.中,自适应控制方法以非线性补偿为基础,通过估计不确定的物理参数,达到提高非线性补偿的效果。该方法的优点是被估计参数的物理意义明确,缺点是控制律比较复杂。

如果换一个角度来看性质1,我们发现,虽然机械手存在建模误差,但是如果通过高增益控制,实际上是可以提高控制精度的。在滑模控制中就利用了这一性质。基于上述方案设计的控制律具有公式简单的优点,但它也有缺点,即由于增益过大,隐藏着诱发振

动的可能性,而这个现象是人们所不期望的。为了克服这个缺点,井村等提出了一种方案^[14],该方案在高增益控制的鲁棒控制律中自适应地对增益进行调节,让增益不大于所需要的数值。

下面介绍它的结果。

结果3 给定机械手(式(2.617))目标轨迹 $q_d(t)$ 、允许误差精度为 $\epsilon > 0$ 以及 $M(q)$ 、 $c(q, \dot{q})$ 、 B 、 $g(q)$ 的标称值 $\hat{M}(q)$ 、 $\hat{c}(q, \dot{q})$ 、 \hat{B} 、 $\hat{g}(q)$ 。考虑下面构成的控制律:

$$u = \hat{M}(q)\tau + \hat{c}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{B}\dot{q} + \hat{g}(q) \quad (2.656)$$

$$e = q - q_d \quad (2.657)$$

$$\tau = \ddot{q}_d - (\lambda + k)e - \lambda ke \quad (2.658)$$

$$k = \frac{\gamma \|y_d\|}{\lambda \epsilon} \quad (2.659)$$

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \omega \|s\| \|y_d\| & \text{if } \|s\| \geq \lambda \epsilon \\ 0 & \text{if } \|s\| < \lambda \epsilon \end{cases} \quad (2.660)$$

$$\hat{\gamma}(0) = 0 \quad (2.661)$$

式中, λ 为任意的正常数。这样,就存在某一时刻 $T \geq 0$,使下式成立:

$$\|e(t)\| < \epsilon \quad \forall t \geq T \quad (2.662)$$

式中, $\omega > 0$ 为任意常数。

简要证明 利用李亚普诺夫方法。

该控制律的作用是通过式(2.656)尽可能地非进行非线性补偿,而建模误差部分则借助于式(2.658)的高增益反馈控制加以处理。在式(2.660)中,增益 k 的大小从零逐渐增大变化,使误差减少。最终当控制误差缩小到 ϵ 的时刻,使增益的增量变为零。

还有人提出一种研究方案,该方案虽然不属于纯粹的自适应控制,但它把自适应辨识引入到自适应增益定序控制中,所以也能将其视为一种自适应功能。相关内容请参阅文献[15]。在文献[16]中对更一般性的自适应控制及学习控制进行了综述。

4. 自适应控制在机械系统中的应用

除了在地面上用的机械手外,人们针对各种机械系统展开了自适应控制的研究。

开展自适应控制的研究事例有浮游在宇宙空间中的卫星上安装的机械手^[17]、行走机器人^[18,19]、非完整系统^[20]等。这些研究除了利用上述性质1~性质5之外,还巧妙地利用

对象各自的特殊性,这样构成的控制系统将更加合理。

大须贺公一

2.7.2 最优控制

最优控制(optimal control)问题考虑的内容是如何操作输入量,使控制对象能完成最期望的动作。最优控制问题可以利用变分法来进行处理,求解满足最优解的必要条件,其中比较有名的可以举出与哈密顿-雅可比方程式条件等效的条件,即所谓的动态规划法的最优化原理(principle of optimality)^[21],以及众所周知的根据 Weierstrass 必要条件得出的条件,即所谓的庞特里亚金极大值原理(maximum principle)^[22]。最优控制的控制对象建模是十分完善的,它基本上属于开环控制法,前提是控制目的能够被评价函数正确地反映出来。

1. 最优控制理论

1) 最优控制问题的公式描述

设控制对象的状态方程式为

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \quad (2.663)$$

式中,设 $x(t)$ 为表示状态的 n 维向量; $u(t)$ 为 r 维输入向量。

设输入的约束条件为

$$\phi(t, x, u) \leq 0 \quad (2.664)$$

式中,设 ϕ 为 l 维向量,雅可比矩阵 $\left[\frac{\partial \phi}{\partial u} \right]$ 具有最大的秩。设实施控制的时间区间为 $[t_0, t_f]$,在该区间的始端和终端,边界条件以下式给出:

$$\Psi(t_0, x(t_0), t_f, x(t_f)) = 0 \quad (2.665)$$

式中,设 Ψ 为 p 维向量,它关于自变量的雅可比矩阵有最大的秩。控制目的就是满足状态方程式、约束条件、边界条件,而且确定使下面的目标函数(评价函数)(objective function (performance index, 性能指标))

$$E = g(t_0, x(t_0), t_f, x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(t, x(t), u(t)) dt \quad (2.666)$$

为最小的状态量 $x(t)$ 及输入函数 $u(t)$ 。

2) 极大值原理

对于上述的最优控制问题,满足其最优解的必要条件可以利用变分法求出^[23]。

最优控制问题的必要条件

满足状态方程式、约束条件、边界条件,并且使目标函数(评价函数)为最小的状态量 $x^*(t)$ 及输入函数 $u^*(t)$,应该满足下述条件:

引入乘数向量 $p(t)$ 和 $v(t)$,令

$$H(t, x, p, u) = -f_0 + p^T f \quad (2.667)$$

则沿最优轨迹 $x^*(t)$ 及 $u^*(t)$,

① 下述欧拉方程式成立:

$$\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i} - \sum_{k=1}^l v_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.668)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} - \sum_{k=1}^l v_k \frac{\partial \phi_k}{\partial t} \quad (2.669)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_j} = \sum_{k=1}^l v_k \frac{\partial \phi_k}{\partial u_j} \quad (j=1, 2, \dots, r) \quad (2.670)$$

$$v_k \phi_k = 0 \quad (k=1, 2, \dots, l) \quad (2.671)$$

② 折点条件: $H(t)$ 及 $p(t)$ 的轨迹(包含折点)对所有的 t 是连续的。

③ 在端点,横截条件成立。对于满足下式:

[令 $x_0 = x(t_0)$, $x_f = x(t_f)$]

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t_0} dt_0 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_0} \right)^T dx_0 + \frac{\partial \Psi}{\partial t_f} dt_f + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_f} \right)^T dx_f = 0 \quad (2.672)$$

的所有的 dt_0 、 dx_0 、 dt_f 、 dx_f ,有

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial g}{\partial t_0} + H(t_0) \right) dt_0 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_0} - p(t_0) \right)^T dx_0 \\ & + \left(\frac{\partial g}{\partial t_f} + H(t_f) \right) dt_f + \left(\frac{\partial g}{\partial x_f} - p(t_f) \right)^T dx_f = 0 \end{aligned} \quad (2.673)$$

④ 维尔斯特拉斯(Weierstrass)必要条件(极大值原理)对于满足约束条件[式(2.664)]的所有的 u ,最优输入 u^* 使 H 为最大值,即

$$H(t, x^*, u^*, p^*) \geq H(t, x^*, u, p^*) \quad (2.674)$$

⑤ 在约束条件[式(2.664)]中,与等号成立对应的乘数为非负的,即

$$v_k(t) \geq 0; k \in [k: \phi_k(t, x^*, u^*) = 0] \quad (2.675)$$

⑥ 对于满足克莱布什(Clebsch)的必要条件

$$\sum_{j=1}^r \frac{\partial \phi_k}{\partial u_j} v_j = 0 \quad (k=1, 2, \dots, l) \quad (2.676)$$

的所有的 $v(\neq 0)$, 必须满足下式:

$$v^T \left[\frac{\partial^2}{\partial u \partial u} (v^T \phi - H) \right] v \geq 0 \quad (2.677)$$

值得指出的是,上述必要条件是求解局部最优轨迹所必需的,而不是全局最优轨迹的必要条件。

3) 奇异最优控制问题

若 $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$, 则最优问题称为奇异最优问题。对于奇异问题,由于无法从 Weierstrass 必要条件求解最优操作量,因此需要其他形式的必要条件^[24]。

广义克莱布什条件

奇异解为最优的必要条件是必须满足下式:

$$\frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{d^m}{dt^m} \left(\frac{\partial H}{\partial u} \right) \right] = 0 \quad (m=1, 3, 5, \dots) \quad (2.678)$$

$$(-1)^{\frac{m}{2}} \frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{d^m}{dt^m} \left(\frac{\partial H}{\partial u} \right) \right] \leq 0 \quad (m=2, 4, 6, \dots) \quad (2.679)$$

式中, m 取式(2.678)左边算出 u 时所对应的值。

这时,奇异控制量由式(2.678)求出。至于其他必要条件或正则最优解与奇异最优解的接合条件等可参阅文献[24]。

4) 哈密顿-雅可比方程式

考虑将始端(t_0, x_0)固定的情况。设存在满足从始端出发到终端(t_f, x_f)为止的状态方程式的最优解 $x^*(t)$ 和 $u^*(t)$ 。对于满足从该解轨迹的中点(t_3, x_3)到终端(t_f, x_f)为止的状态方程式的解的集合 \mathcal{X} , 设评价函数的下限值为

$$W(t_3, x_3) = \inf_x \left[g(t_f, x_f) + \int_{t_3}^{t_f} f_0(t, x(t), u(t)) dt \right] \quad (2.680)$$

将它称为数值函数(value function)。达到该下限值的必定是最优解。这就是最优性原理。由于最优解满足欧拉方程式,因此对于空间 t, x 上的各点,将最优输入 $u^*(t)$ 规定为 $U^*(t, x)$ 。这时,微分方程式

$$\dot{x}(t) = f\{t, x(t), U^*[t, x(t)]\} \quad (2.681)$$

的解即是空间(t, x)的最优轨迹。该解的曲线族所充满的空间被称为最优曲线场,意味着

可以用状态反馈表示最优控制律。在变分法中,最优曲线场的理论称为哈密顿-雅可比(Hamilton-Jacobi)理论。

哈密顿-雅可比-贝尔曼(HJB)方程式

在最优曲线场 (t, \mathbf{x}) 中,对于所有允许的曲线 \mathbf{u} ,下面的数值函数 $W(t, \mathbf{x})$ 不等式:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial W^T}{\partial \mathbf{x}} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + f_0(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \geq 0 \quad (2.682)$$

成立,而当 $\mathbf{u} = \mathbf{U}^*(t, \mathbf{x})$ 时,其等号成立。

若将式(2.667)及 $\mathbf{p} = -\frac{\partial W}{\partial \mathbf{x}}$ 用于式(2.682)中,则得到

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \inf_{\mathbf{u}} H(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, -\frac{\partial W}{\partial \mathbf{x}}) = 0 \quad (2.683)$$

此即哈密顿-雅可比-贝尔曼(HJB)方程式。在 W 对 \mathbf{x} 无法进行微分时,式(2.683)能扩展微分的含义,从而求得解,此时将它称为黏性解(viscosity solution)^[25,26]。

5) 状态附加约束条件的最优控制

下面考虑状态量附加下面的约束条件的情况:

$$\mathbf{h}(t, \mathbf{x}(t)) = \mathbf{0} \quad (2.684)$$

式中,设 \mathbf{h} 为 $m(<n)$ 维向量。由于式(2.684)沿方程式(2.663)的解恒等成立,因此用 t 进行微分可得

$$\mathbf{h}_1 \triangleq \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} + \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (2.685)$$

若式(2.685)中 \mathbf{u} 不是显式的,可以进一步对 t 进行微分,直到 \mathbf{u} 出现为止。如果经过 q 次微分使 \mathbf{u} 出现,那么式(2.684)就被称为 q 次状态约束条件。若 \mathbf{u} 出现,则利用该式可决定 \mathbf{u} 的一部分。由于操作量将轨迹集聚于约束面上,故剩下的操作量可以用于使评价函数最优。因此,在状态附加约束条件时极大值原理仍然是适用的。有关它的进一步分析,以及涉及不等式给出约束条件的分析,可以参阅文献[23]。

不过值得注意的是,如果状态附加了约束条件,那么可能发生是否可达的问题,有时可能会产生不可控区域。这一点在采用最优控制之前需要加以研究。

2. 机械手的最优控制

机械手控制的主要任务是考虑离线轨迹

规划和实施对给定轨迹的在线闭环跟踪控制问题。轨迹规划多采用最优控制,特别是采用最短时间的控制。该问题又可以分为两种情况进行讨论:一种情况是仅给出起点及终点,求解以最短时间连接该两点的轨迹;另一种情况是给出机器人的轨迹曲线,求解最短时间控制。设机器人手臂的动力学用下式表示:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (2.686)$$

式中, $\mathbf{q}(t)$ 为 n 维广义坐标向量; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为 $n \times n$ 惯性矩阵; $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为表示哥氏力、离心力、黏性摩擦、重力项之和的 n 维向量; $\boldsymbol{\tau}(t)$ 为 n 维广义力向量。对输入施加如下约束条件:

$$\tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.687)$$

为了对控制进行分析,将式(2.686)变换成状态方程式。设 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}, \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$,则有

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_1^T(t), \mathbf{x}_2^T(t)]^T = [\mathbf{q}^T(t), \dot{\mathbf{q}}^T(t)]^T \quad (2.688)$$

设 $\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\tau}(t)$,采用式(2.663)的形式,式(2.688)可以改写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t) \quad (2.689)$$

假设机械手的运动情况是,在初始时刻 $t=t_0$ 的初始位置处于静止状态,然后根据输入 $\boldsymbol{\tau}(t)$ 运动,一直到结束时刻 $t=t_f$ 给出的终点位置为止,最后回到静止状态,即边界条件为

$$\mathbf{x}_1(t_0) = \mathbf{q}_0, \mathbf{x}_1(t_f) = \mathbf{q}_f, \mathbf{x}_2(t_0) = \mathbf{x}_2(t_f) = \mathbf{0} \quad (2.690)$$

1) 求解两点之间以最短时间连接的轨迹

以下式作为最短时间控制的评价函数:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} 1 dt \quad (2.691)$$

Wen 和 Desrochers^[27]针对最短时间最优控制问题存在最优解的条件进行了研究,得到了一个最优解存在的不等式,它与哥氏力及离心力项的大小有关。

设最优解存在,则可以采用最优解应该满足的必要条件。根据式(2.667),得

$$H = -1 + \sum_{i=1}^n p_i (F_i + \sum_{j=1}^n G_{ij} u_j) \quad (2.692)$$

采用极大值原理,则为

$$u_j = \begin{cases} \tau_{j\min}, & \sum_{i=1}^n p_i G_{ij} < 0 \\ \tau_{j\max}, & \sum_{i=1}^n p_i G_{ij} > 0 \end{cases} \quad (2.693)$$

于是可知这属于 Bang-Bang 控制。Kahn 及

Roth^[28]针对三杆件模型对式(2.693)进行了具体计算。不过发现有时在轨迹的途中会产生奇异控制的问题,此时下式成立:

$$\sum_{i=1}^n p_i G_{ij} \equiv 0 \quad (2.694)$$

如在(1.3)中所述,将式(2.694)对 t 进行微分可以得到奇异控制量。Sontag 和 Sussmann^[29]通过对 n 杆件系统建模,证明在任何时间、区间内都不会有全部操作量同时为奇异控制量的情况。他们已经掌握最短时间问题对于任何可控线性系统均无奇异解,不过他们认为,机械手方程式的线性化系统在不可控时将会出现奇异解。

2) 机械手轨迹曲线给定

设机械手的轨迹曲线可以通过一个参数 $\mu(t)$ 来描述,即

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{s}(\mu(t)) \quad (2.695)$$

这时,由于有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}(t) = \frac{d\mathbf{s}}{d\mu} \dot{\mu}(t) = \dot{\mu} \dot{\mathbf{s}} \\ \ddot{\mathbf{q}}(t) = \frac{d^2\mathbf{s}}{d\mu^2} \dot{\mu}^2 + \frac{d\mathbf{s}}{d\mu} \ddot{\mu} = \dot{\mu}^2 \ddot{\mathbf{s}} + \ddot{\mu} \dot{\mathbf{s}} \end{cases} \quad (2.696)$$

若将式(2.696)代入式(2.686)中,则可以得到

$$\dot{\mu}^2 \mathbf{M}(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}} + \ddot{\mu} \mathbf{M}(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{h}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}, \dot{\mu}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (2.697)$$

若 $\mu(t)$ 已经决定,则能够决定全部操作量 $\boldsymbol{\tau}(t)$ 。因此,最优控制中能够使用的操作量为一个。将该 n 个式子中的一个,例如,选第1式,看作为将 $\tau_1(t)$ 作为输入的关于 $\mu(t)$ 的方程式,对此考虑采用最短时间控制。

令

$$\mathbf{m} = \mathbf{M}(\mathbf{s}) \dot{\mathbf{s}}, \quad \mathbf{n} = \mathbf{M}(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}}$$

用状态变量表示式(2.697)的第一项,即有下式:

$$\begin{cases} \dot{\mu} = \eta \\ \dot{\eta} = -\frac{n_1}{m_1} \eta^2 - \frac{h_1}{m_1} + \frac{1}{m_1} \tau_1 \end{cases} \quad (2.698)$$

将 τ_1 作为输入,考虑该2次型的最短时间控制问题。这里,输入 $\boldsymbol{\tau}$ 中存在基于式(2.687)的约束。从 τ_1 和式(2.697)的剩余式子求得 $\tau_i (i=2, 3, \dots)$ 。根据约束条件,给出:

$$\tau_{\min} \leq \tau_1 \leq \tau_{\max} \quad (2.699)$$

$$\tau_{\min} \leq m_i \eta + n_i \eta^2 + h_i \leq \tau_{\max} \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (2.700)$$

式(2.700)描述了状态的约束条件,不过由于它是 μ 和 η 的函数,因此可以在 μ - η 平面上描绘它的范围,该范围的内部即为允许区域。有文献指出^[31],有时允许区域情况会变得相当复杂,例如它们不一定彼此单连通,甚至禁止区域形成孤岛形状。

有研究指出,在机械手的轨迹曲线中也存在奇异轨迹,Z. Shiller 证明,不产生奇异控制的条件是允许控制的集合是强凸集合^[32]。

3) 具有冗余性的机器人手臂^[33,34]

如果作业环境中存在比较错综复杂的障碍物,那么可以考虑让机械手具有更多的自由度,发挥冗余性的特点来完成复杂的轨迹规划。设 n 杆件的关节坐标向量为 \mathbf{q} , 用 $m (< n)$ 维向量 $\mathbf{s}(t)$ 表示目标轨迹,则根据运动学有如下式所示的关系:

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}(t)) = \mathbf{s}(t) \quad (2.701)$$

为了根据给定的目标轨迹决定关节坐标,将式(2.701)两边对时间进行微分,得到

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{s}}(t) \quad (2.702)$$

式中, $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{q}}$, $\mathbf{q} \in R^{m \times n}$, 为雅可比矩阵。由于有冗余性,有 $m < n$, 因此式(2.702)有无数多个解,若用 \mathbf{J} 的广义逆矩阵 $\mathbf{J}^\#$ 求解式(2.702),则成为

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{s}}(t) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^\# \mathbf{J}) \mathbf{y} \quad (2.703)$$

式中, \mathbf{y} 为任意的 n 维向量。问题在于如何决定向量 \mathbf{y} , 可以将式(2.703)看作为关于 \mathbf{q} 的状态方程,将 \mathbf{y} 看作为输入,利用使评价函数

$$E = \int_{t_0}^{t_f} f_0(\mathbf{q}, \mathbf{y}, t) dt \quad (2.704)$$

为最小的最优控制问题来决定 \mathbf{y} 。

Galicki^[35]通过采用本节2)中的广义化手法来处理冗余性机器人手臂。设 n 杆件的关节坐标向量为 \mathbf{q} , 用 m 维向量 $\mathbf{s}(t)$ 表示目标轨迹,根据运动学可得下式所示的 m 个方程:

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}(t)) - \mathbf{s}(\mu(t)) = 0 \quad (2.705)$$

根据式(2.705)提供的状态约束条件,我们来考虑沿目标轨迹的最短时间问题。将该 m 个方程分为开始的一个方程和剩下的 $m-1$ 个方程,即

$$R_1(\mathbf{q}(t)) - s_1(\mu(t)) = 0 \quad (2.706)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{q}(t)) - \boldsymbol{\sigma}(\mu(t)) = 0 \quad (2.707)$$

若将式(2.706)用 t 进行两次微分,则得到

$$\begin{cases} J_1^T \dot{q} - \frac{ds_1}{d\mu} \dot{\mu} = 0 \\ J_1^T \ddot{q}(t) + \dot{q}^T J_1 \dot{q} - \frac{d^2 s_1}{d\mu^2} \dot{\mu}^2 - \frac{ds_1}{d\mu} \ddot{\mu} = 0 \end{cases} \quad (2.708)$$

其中,

$$J_1 = \frac{\partial R_1}{\partial q}, \quad J_1 = \frac{\partial^2 R_1}{\partial q \partial q}$$

将式(2.708)的第2式附加在式(2.686)上,系统被扩展成:

$$\begin{bmatrix} M & O \\ J_1^T & -\frac{ds_1}{d\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \mu \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h(q, \dot{q}) \\ \dot{q}^T J_1 \dot{q} - \frac{d^2 s_1}{d\mu^2} \dot{\mu}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ O^T \end{bmatrix} \tau \quad (2.709)$$

再根据操作量的约束条件(式(2.687))和状态约束条件(式(2.707)),来考虑最短时间控制。此时与前面仅固定起点、终点的问题不同,由于有多个操作量(至少有 $(m-1)$ 个)被用于跟踪给定轨迹,因此用于最短时间控制的操作量最多可达 $(n-m+1)$ 个。关于这一点, Galicki 给出了如下的命题,即“在指定轨迹最短时间控制的最优解中,达到饱和时操作量最多可至 $(n-m+1)$ 个”^[35]。

4) 非完整系统的最优控制

人们已经知道,以车辆系统为代表的非完整系统,依靠光滑的、时不变状态反馈是无法满足在任意给出的两点之间移动那样的控制,却能够实现车辆反向这样无须微分的轨迹^[37]。因而,必须借助于黏性解的解法来处理非完整系统的最优解哈密顿-雅可比方程问题。今福^[36]以三轮移动体的最优控制问题为例,利用有限差分近似法求解哈密顿-雅可比方程,得到了黏性解,并构成非线性最优调节器。井前等^[38]将非完整系统的轨迹规划问题视为波尔查问题,用公式对其加以描述,提出最优轨迹计算的算法。他以宇宙机器人的姿态控制问题作为应用实例进行了计算。

5) 最优轨迹计算法

为了利用最优控制的必要条件来计算最优轨迹,必须按照极大值原理(式(2.674))来决定操作量,再根据横截性条件规定乘数向量 p 的边界条件,从起点及终点的两点边界条件,求解式(2.663)和式(2.668),即状态向量与乘数向量的联立微分方程。为此,有两

种方法可供选择:一种叫做前向法(forward method),是先假定未知的初始值,当作初始问题来求解问题;另一种叫做后向法(backward method),是先假定未知的终点值,在时间上倒过来进行求解,但是后向法同时存在轨迹发散与收敛的情况,在维数偏高时求解就变得比较困难。选择前向法时,人们常采用 shooting 法。关于各种梯度法的计算方法可参阅文献[23]的第7章。但是,在最短时间控制问题中,由于最优操作量采用 Bang-Bang 控制,因此必须想一些新的办法。例如, Fotouhi-C 和 Szyszkowski^[39]提出了将前向法与后向法结合的 shooting 法。

所谓 shooting 法,是针对微分方程

$$\dot{X} = F(t, X) \quad (2.710)$$

并在假设 $X = [X_1^T, X_2^T]^T$, 给出两点边界条件为

$$X_1(t_0) = X_{10}, X_2(t_f) = X_{2f}$$

和设定未知初始值 $X_2(t_0)$ 的条件下,求解式(2.710),将求解出的终点值的平方误差

$$E_{\pi} = (X_2(t_f) - X_{2f})^T (X_2(t_f) - X_{2f})$$

作为评价函数,视它为未定义的初始值 $X_2(t_0)$ 的函数,再利用非线性规划法,求出使评价函数取得最小的初始值。

Chen 和 Huang^[40]提出了所谓的 ϵ 法,它对改善含奇异控制区间的最小时间最优轨迹计算,表现出明显的效果。该方法将评价函数(式(2.691))改变为

$$E = \int_{t_0}^{t_f} \left(1 + \frac{1}{2} \epsilon_k u^T(t) R u(t) \right) dt \quad (2.711)$$

式中, ϵ_k 为正的摄动参数, $\lim_{k \rightarrow \infty} \epsilon_k = 0$; R 为正值对角权重矩阵。借助于 shooting 法求解满足两点边界条件下的该评价函数,使 ϵ_k 逐渐减小,便能够得出 Bang-Bang 控制与奇异控制混合问题的解。

Kim 等^[41]把有关机器人手臂系统的平方评价最优问题视为求解 HJB 方程的过程,开发了神经网络智能控制法。此外, H. Seywald, R. R. Kumar 和 S. M. Deshpande^[42]给出了遗传算法的最短时间控制的例子。该方法将时间区间做 N 等分,用 $3N$ 位表示其上的三个操作量,用 20 位表示终点时间,以 $3N+20$ 的字符串长将终点值的绝对值之和作为适应度值进行搜索,为梯度计算提供初始值。

嘉纳秀明

2.7.3 学习控制

1. 引言

在多数应用场合中,机器人在某一有限时间区间 $[0, T]$ (T 为运动结束时刻)内的目标运动往往是给定的。此时,对控制的要求,除了以往的保证在时间趋于无限大的条件下运动的稳定性问题以外,还应该考虑在该时间区间内如何经过多次反复运动,使运动越来越接近目标的问题。这一控制方式的思路正如我们人类借助于身体多次实际的运动,学习理想运动模式的过程。

具体来说,在实施数字控制的条件下,首先按照适当的采样间隔将目标运动模式离散化,以时间序列信号的形式给出。然后,按照适当的输入模式驱动机器人,再将它的运动与目标运动之差作为误差存储起来。在接下来的试行时,根据前面的误差修正前一次的输入模式,再提供给机器人执行,反复这样的操作,最终的效果就是将目标运动按照时间序列信号的形式构成输入模式。

上述控制的方式意味着,我们并未根据机器人的参数来计算机器人的逆动力学问题,而多次反复进行称为“试行”的一种试验动作,在这个过程中求解。该控制方式的优点在于,不需要估计机器人的杆件质量、惯性矩及摩擦等。它属于机器人运动控制的一种方法,通常称之为学习控制(learning control)或反复学习控制(iterative learning control)。

2. 学习控制的结构

在讲解学习控制的算法之前,先对有关的问题做一些设定。

① 预先给出在整个有限时间区间内的理想运动模式,即假设预先给出在有限时间区间 $[0, T]$ 内所定义的目标输出 y_d 。

② 在整个有限时间区间 $[0, T]$ 内多次反复进行与人的训练过程相对应的控制对象驱动。

③ 在每次试行时,初始条件都一样。例如,在机器人关节角 $q(t)$ 用二阶微分方程表示的动力学条件下,以下式作为第 k 次试行时的对象系统的初始状态 $q_k(0)$:

$$\begin{aligned} q_k(0) &= q_0, \\ \dot{q}_k(0) &= p_0 \quad (k=1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (2.712)$$

式中, q_0 及 p_0 分别为初始位置和初始速度向量。对于具有很好的运动重复能力的工业机器人对象来说,该假定是应该完全可以满足的。

④ 对象系统的动力学在练习中不改变。

⑤ 每次试行时都能够测量输出 $y_k(t)$ 。因此,为了决定下一次试行的控制输入,例如,可以利用下式所示的误差信号:

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (2.713)$$

⑥ 由第 k 次试行后的结果按照下述算法进行更新,得到第 $k+1$ 次试行的控制输入 $u_{k+1}(t)$:

$$u_{k+1}(t) = F(u_k(t), e_k(t)) \quad (2.714)$$

关于如何给出式(2.714)中的函数 F ,将在下面详细叙述。在实际应用上,选择能够保证学习效果,又不需要进行复杂计算处理的函数。

⑦ 更新后的输入 $u_{k+1}(t)$ 代替前一次的输入 $u_k(t)$ 被存储下来。

⑧ 通过学习来改善控制的性能,这可以用下面的数学形式来描述:

$$\|e_{k+1}\| \leq \|e_k\|$$

而且

$$\|e_k\| \rightarrow 0, k \rightarrow \infty \quad (2.715)$$

或者以更明显的形式表示为

$$\|e_{k+1}\| \leq \rho \|e_k\| \quad (k=1, 2, \dots, 0 \leq \rho < 1) \quad (2.716)$$

图 2.98 给出学习控制的整个算法。

如果上述式(2.714)中的初始值有误差,或者式(2.715)所描述的对象动力学发生了变化,而误差收敛的情况也不至于变得很差,则下面我们将算法的这种特性称为学习控制的鲁棒性。

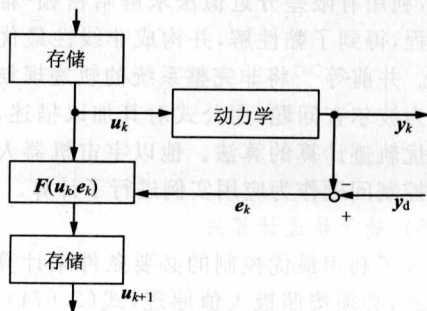


图 2.98 学习控制的算法

3. 输入构成方法

设机器人作为刚性杆件机构,动力学用下

面的二阶非线性常微分方程表示:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (2.717)$$

式中, $\mathbf{q}(t)$ 为关节角坐标 ($n \times 1$), $\mathbf{q}(t) = (q_1, q_2, \dots, q_n)$; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为刚性矩阵 ($n \times n$); $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为哥氏力和离心力 ($n \times 1$); \mathbf{B} 为黏性摩擦系数矩阵 ($n \times n$); $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 为重力项 ($n \times 1$); $\boldsymbol{\tau}(t)$ 为输入转矩 ($n \times 1$)。在这里, 作为输入转矩只有在学习控制的场合生成的前馈输入, 输入转矩还可以控制机器人。但是, 如果扰动不具有重复性, 为了在一定程度上保证轨迹跟踪, 在实际应用中通常同时使用反馈输入和前馈输入。例如, 设输入为下式:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{u} \quad (2.718)$$

式中, \mathbf{K}_p 为位置反馈增益矩阵; \mathbf{K}_v 为速度反馈增益矩阵; \mathbf{u} 为通过学习形成的前馈输入, 设反馈增益矩阵为正定对称矩阵。

通过学习来形成前馈输入, 重要的有以下两点:

① 对象的动力学中, 将什么信号看作是输出信号。

② 如何具体地给出输入修正式 (2.714)。

有两种情况在原理上是相同的: 一种情况是将位置信号作为输出, 通过输入过程的微分操作来计算速度误差, 再对输入进行修正; 另一种情况是直接将速度信号作为输出, 计算速度误差, 乘以常系数的学习增益。可见, 上述①、②不是独立的。不过其与传统反馈控制的数值差分的不同之处在于, 学习控制不需要实时计算数值微分, 它就是时刻 t 前后所呈现并获取的两个数值。实际上, 在多数情况下, 传感器测量的机器人位置和速度等信号经常被取作来自机器人的输出信号, 然后送入计算机。假设仅取出位置信号作为输出, 对于常系数线性系统来说, 在理论上很容易被证明, 如果特定频率超出了一定范围, 那么输出乘以常数增益矩阵再加入到输入上后, 每一次反复试行都会导致误差增大^[43]。

对机器人来说情况也一样, 由于位置误差的缘故, 仅用常数增益矩阵修正输入, 是无法实现目标运动的。不过, 位置信号在噪声等方面的可靠性高, 测量方便。因此, 人们对位置信号输出后, 如何将它进行修正并再引回输入方面, 进行了各种研究^[43~47]。这时, 设计学习控制系统需要考虑的基本问题是对象

的动力学在何种程度上利用了知识。假设人们能够正确地估计作为研究对象的机器人动力学的参数, 那么利用位置、速度、加速度信号, 构筑好逆系统, 甚至在第二次试行时就能够使误差收敛为零。但是, 反复型学习控制真正能够发挥作用的情况, 还不是在上述场合, 而是在对象的动力学包含未知参数的场合, 或者参数估计十分困难、非常麻烦的场合。因而, 若能够进行输入修正, 希望修正的方法最好简单一些, 不需要复杂计算或不包含输入修正的参数估计的算法, 从实用的角度看更具有推广的价值^[48]。

反复学习控制的研究进展至今, 人们已经掌握, 为了用简单的常系数学习增益矩阵修正输入, 必须采用速度误差或加速度误差^[49~55]。为此, 有本等提出了 P 型学习控制形式 (将输出视为速度信号, 并对速度误差乘上常系数学习增益矩阵的学习形式) 和 D 型学习控制形式 (误差修正中包含微分动作, 并根据加速度误差修正输入的学习形式)。他们将学习控制中利用位置误差的情况描述为 I 型, 并将 I 型与上述两种学习形式结合起来, 分别描述为 PID 型或 PI 型等。不过, 如果机器人的实际输出是编码器等传感器得到的位置信息, 那么只有将该信息数值进行微分后得到速度信号再用于机器人动力学的输出。下面, 我们根据这样的描述方法, 来讲解 D 型学习控制和 P 型学习控制。

4. D 型学习控制

在 D 型学习控制^[49,50]时, 输入修正按下式进行:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{k+1}(t) &= \mathbf{u}_k(t) + \boldsymbol{\Gamma} \dot{\mathbf{e}}_k(t) \\ \mathbf{e}_k(t) &= \dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}_k(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.719)$$

式中, 矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}$ 为学习增益矩阵, 设它为正定对称矩阵。另外, 设来自机器人的输出信号为速度信号。因此, 该输入修正方法必须将前一次的速度信号进行数值微分, 利用加速度误差来修正输入。

例如, 通过以下的步骤可以证明运动误差是收敛的^[56]。首先, 设定理想的运动 $\mathbf{q}_d(t)$, 存在实现该理想运动的输入 $\mathbf{u}_d(t)$ 。设第 k 次试行时与输入 $\mathbf{u}_d(t)$ 之差为 $\Delta \mathbf{u}_k(t)$ ($\Delta \mathbf{u}_k = \mathbf{u}_d - \mathbf{u}_k$), 于是能推导出以下的关系:

$$\|\Delta \mathbf{u}_{k+1}\|_\lambda \leq \rho \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \quad (2.720)$$

式中, $0 \leq \rho < 1$, 范数 $\|\cdot\|_\lambda$ 定义如下:

$$\|\Delta u_k\|_\lambda \triangleq \max_{t \in [0, T]} e^{-\lambda t} \|\Delta u_k(t)\| \quad (2.721)$$

式中, $\|\Delta u_k(t)\|$ 为适当的向量范数。

式(2.721)所定义的范数意味着随着参数 λ 的增加, 对于时间的开始阶段加大权重。这种范数的含义很重要。即动态系统在接近初始时间的时刻有误差, 到运动的后半期虽然与目标运动一致了, 但是由于系统是动态的, 因此若在接近初始时间的时刻进行输入修正, 则可能会对后半期的运动产生影响, 反倒成为扩大误差的诱因。因此, 从初始时刻至最后时刻应该始终设想机器人的运动与目标运动是一致的。式(2.721)对这一现象进行了评价。

根据式(2.720), 增加试行次数 k , 输入误差按指数函数减少, 最终输入误差为零。结果证明位置及速度的误差收敛于零。

5. P型学习控制

D型学习控制能够保证按指数函数收敛。这是由于能够利用加速度误差进行输入修正的缘故。但是, 由于噪声等问题, 有时出现仅根据加速度误差并不能实现高精度运动的情况。因此, 从实用的观点来看, 基于速度误差的P型学习控制也很重要。不过它的证明过程过于复杂, 理论上很难保证误差能按指数函数收敛。

在P型学习控制^[51~54]中, 误差收敛如下所示。首先, 用下式给出输入修正:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Phi e_k(t) \quad (2.722)$$

式中, 矩阵 Φ 为正定对称矩阵。另外, $e_k(t)$ 为用下式给出的目标输出误差:

$$e_k(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}_k(t) \quad (2.723)$$

或者

$$e_k(t) = \dot{q}_d - \dot{q}_k + \alpha S(q_d - q_k) \quad (2.724)$$

式中, α 为正数, 设式(2.724)中的 $S(\cdot)$ 为参阅文献[54], [55]中定义的饱和函数。在式(2.724)中, 由于利用到位置误差, 因此它属于PI型学习控制。

取与实现目标运动的目标输入之差, 设为 Δu_k , 可以导出以下的不等式:

$$\|\Delta u_{k+1}\|^2 \leq \|\Delta u_k\|^2 - \beta \|\Phi e_k\|^2 \quad (2.725)$$

式中, 设 β 为正数。另外, $\|\Delta u_k\|^2$ 定义如下:

$$\|\Delta u_k\|^2 = \int_0^T \Delta u_k^T(t) \Phi^{-1} \Delta u_k(t) dt \quad (2.726)$$

式中, 范数 $\|\Delta u_k\|$ 始终大于零, 并且有下限。不等式(2.725)的右边第二项的 $\|\Phi e_k\|^2$ 由于经常为正或零, 因此 $\|\Delta u_k\|$ 收敛于某一个值。这时, $\|\Phi e_k\|^2$ 必须不为零。即在 $k \rightarrow \infty$ 中, $\|\Phi e_k\|^2 \rightarrow 0$ 。不过, 理论上不能保证学习途中的试行次数按照指数函数收敛。

究竟能否推导出式(2.725), 是与系统的被动性有关的。更加明确的描述形式可以表明, 下面的输出耗散性与线性系统有很密切的关系。

输出耗散性: 若某 $r_0^2 > 0$, 则存在 $r^2 > 0$, 在任意的时刻 t , 有以下的不等式成立:

$$\int_0^t u^T(\tau) y(\tau) d\tau \geq -r_0^2 + r^2 \int_0^t \|y(\tau)\|^2 d\tau \quad (2.727)$$

设具有非线性动力学性质的机器人距离目标运动的偏移量为 Δy , 这时的输入误差为 Δu , 则由于式(2.727)成立^[54], 因此能够进行P型学习控制。

从式(2.723)可以看出, 仅利用速度误差的场合, 范数应该改成L2范数, 即将范数与类似于D型学习控制中的时间权重相乘的结果。若反馈增益等条件得到满足, 可以证明, 用通常的L2范数, 式(2.724)也是成立的^[54]。

6. 鲁棒性

在D型学习控制的场合, 我们能够证明误差是按照指数函数规律减少的。这时, 即使初始值或动力学有振荡, 也仍然能够按照式(2.721)定义的范数证明学习结果收敛, 以及在极端情况下运动不会偏离目标而运动^[57]。实际上, 实验也能够确认同样的事实。

不过, 换成P型学习控制场合, 由于无法保证误差按照指数函数收敛, 因此无法保证上述学习控制的鲁棒性。但是, 按如下改变输入修正律, 就能保证鲁棒性^[54]:

$$u_{k+1}(t) = (1-a)u_k(t) + au_0(t) + \Phi e_k(t) \quad (2.728)$$

式中, 设 a 为适当小的正数; $u_0(t)$ 为第一次输入模式。式(2.728)通过引入忘却系数 a (一部分输入造成的行为被忘却), 就能保证出现与D型学习控制类似的情况, 即误差按指数函数收敛。

7. 学习控制的实际应用

如果机器人动力学能够用式(2.717)来描述,若再将速度误差(或速度和位置的误差)引入输入修正,那么在多数情况下是很方便的。这时,虽然在理论上不能保证按指数函数的收敛,但实际上,根据很多实验结果,确认了按指数函数收敛的事实。实验的另一个结果是,虽然理论上学习的收敛值为零,但实际上根据条件却收敛于某一定值。在多数情形下,信号中包含的噪声大小、传感器的分辨率、驱动器的实际精度等因素决定了该学习的收敛值。另外,式(2.717)中并未涉及迟滞、机械系统的间隙、死区时间等非线性效果,如果将它们的影响也考虑进去,那么有时会出现学习收敛恶化,或者无法学习的结果。

图 2.99 给出了一个实验,作为进行学习控制的示例。这是一个 3 个自由度机器人运动的学习控制结果,在 PI 型学习控制中采用位置和速度的误差来修正输入。不过,这个实验并未用到式(2.724)的饱和函数。纵轴表示各关节误差平方积分均方值的平方根。由图 2.99 可知,位置误差随试行次数按指数函数收敛的事实得到确认。

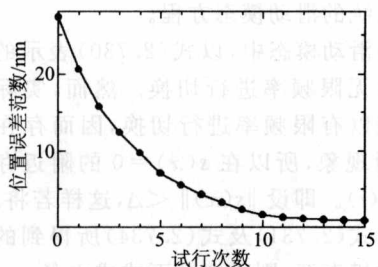


图 2.99 PI 学习控制的误差收敛情况

图 2.100 给出误差随时间收敛的趋势。图 2.100 中将各时刻的末端目标位置与实际位置用直线连接的距离作为误差,表示误差随时间的变化。由图 2.100 可知,设试行次数为 k ,每进行一次试行,误差就随之减少。

至于式(2.718)的位置及速度的反馈增益,由于其设定值较小即可,因此增益的调整并不麻烦。同时,学习增益的设定也比较容易。从实用的观点来看,这一点正是本方式的优点。

8. 结束语

学习控制不仅可以用于机器人,也便于

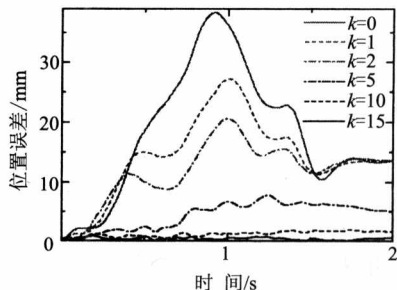


图 2.100 误差随时间的变化逐渐收敛的情况

推广到其他机电一体化设备和工厂控制^[58,59]。越在对象动力学参数很难辨识或很麻烦的场合,它的有效性越发挥得淋漓尽致。针对机器人末端与对象接触时的条件,人们也提出了力和位置两个方面学习控制来实现高精度控制的方案。在这样的情况下,多数情况难以估计与末端摩擦力有关的参数,因此学习控制就显示出极大的优越性。沿用以往的结构框架,从理论上能够证明,在 D 型学习控制中,力和位置两个方面的误差都按照指数函数收敛^[60]。至于采用 P 型学习控制,那么为了在理论上证明除了位置以外,力的误差也收敛于零,必须对其进行其他处理^[54]。

人们还提出一种方法,将一次学习控制得到的输入,通过时间轴变换后用于别的运动模式,而非学习^[61],例如,用于实际的最短时间控制^[62]等。

上面我们讲解了机器人的反复学习控制,有关它的实际利用和理论上的结构框架,以及更实际的应用方法和理论上的详细证明等可参阅参考文献。可以预计,今后该方法将在实用性及理论性两个方面继续得到研究和开发。

川村贞夫

2.7.4 非线性控制

众所周知,刚性臂的各关节的运动相互耦合,导致其具有非线性动态特性,其物理参数将随手臂负荷等因素的变化而变动。因此,要理想地控制刚性臂的运动,必须考虑手臂的非线性问题和如何解决因负荷变动等因素造成物理参数的不确定性问题。相应的控制方法有下面两种方案:一种是通过非线性反馈把机器人的动态特性线性化,再针对线性化后的系统构成适应参数变动的鲁棒控制

系统^[63~67];另一种是直接针对刚性臂的非线性和参数的不确定性设计有效的控制律。前一种方案已经在2.4.1节中加以说明,下面介绍后一种方案的典型控制算法,即基于变结构系统(variable structure system)的滑动模态(sliding mode)实施变结构控制(variable structure control)。

近年来,在非线控制领域中还引入了非完整系统,本小节的后半部分还将对具有非驱动关节的机械手,即欠驱动机械手的控制问题进行说明。

1. 变结构系统及其滑动模态^[68~70]

在进入刚性臂控制研究之前,我们首先对变结构系统及其滑动模态加以简单说明。让我们考虑如下式所示的系统:

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t)u(t) \quad (2.729)$$

式中,令 $x(t) \in R^n$ 为 n 维状态向量; $u(t) \in R^m$ 为 m 维输入向量; $A(x, t) \in R^n$ 和 $B(x, t) \in R^{n \times m}$ 均为状态 x 和时间 t 的函数。

当该系统输入 $u(t)$ 的各个元素 $u_i(t)$ 分别随状态空间内的光滑曲面 $s_i(x) = 0$ 按下式:

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i^+(t, x), & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(t, x), & s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2.730)$$

进行切换时,则称这个系统是变结构(variable structure)的,或者把这样的系统称为变结构系统(variable structure system)^[68]。另外,各曲面 $[s_i(x) = 0 (i=1, 2, \dots, m)]$ 的相交处

$$s(x) = [s_1(x), s_2(x), \dots, s_m(x)]^T = 0 \quad (2.731)$$

被称为切换面(switching surface)。通常将 $s_i(x) = 0$ 称为切换函数(switching function),也可称之为切换面。在这里,为了叙述简单起见,令切换面 $s=0$ 仅是状态的函数,而且是时不变的,当然设它同时为时间和状态的函数,即 $[s(x, t) = 0]$ 也未尝不可^[68, 73]。

现在,设在切换面 $s(x) = 0$ 上系统是稳定的,而且系统的状态按照式(2.730)的输入 $u(t)$ 约束于这个切换面上,那么就有式(2.731)成立。

约束于切换面上的系统的状态称为滑动模态(sliding mode)(图2.101)。切换面有时也被称为滑动面(sliding surface)。

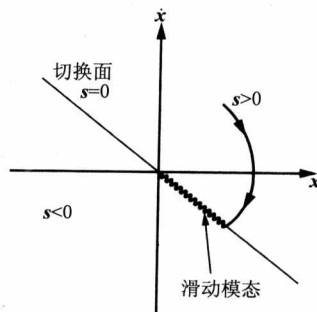


图 2.101 滑模举例

由式(2.731)有下式:

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} \dot{x} = GA + GBu = 0 \quad (2.732)$$

其中,

$$G = \frac{\partial s}{\partial x}$$

在式(2.732)中,如果 $\det GB \neq 0$,即 GB 的逆矩阵存在,则可以认为在系统中可以等价地加上下式所示的输入:

$$u_{eq} = -(GB)^{-1}GA \quad (2.733)$$

把 u_{eq} 称为等效输入(equivalent input)。这时系统的状态用下式表示:

$$\dot{x} = A - B(GB)^{-1}GA \quad (2.734)$$

这是系统的滑动模态方程。

在滑动模态中,以式(2.730)表示的输入应该以无限频率进行切换。然而,实际的输入只能以有限频率进行切换,因而存在延迟和滞后现象,所以在 $s(x) = 0$ 的附近存在解轨迹 $x(t)$ 。即设 $\|s(x)\| < \Delta$, 这样若将 $x^*(t)$ 作为由式(2.731)及式(2.734)所得到的理想的滑动模态解,则可知有下式成立^[68]:

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} x(t) = x^*(t) \quad (2.735)$$

即在等效输入唯一确定的场合,实际滑动模态存在于理想滑动模态的附近。

2. 可变结构控制

如果能够用式(2.730)的输入将系统的状态 x 约束于切换面上,即若能设计滑动模态存在的输入,那么即使在系统中存在着参数的变动和干扰,在式(2.731)所表示的切换面上,系统的状态也不至于受到影响。因此说,如果能设计这样的切换面,使系统处于所期望的状态下,则即使系统中存在干扰和参数变动,也能实现所期望的特性。这就意味着,变结构系统可以构成对系统的参数变动

和干扰具有很强的鲁棒性的控制系统。利用变结构系统的滑动模态实施的控制称为变结构控制(variable structure control)^[71]。

在变结构系统的设计中,必须保证以下条件:

① 依系统所期望具有的动态特性来设计稳定的切换面 $s(x)=0$ 。

② 按照系统的状态到达切换面,并在切换面上满足滑动模态存在的要求来设计输入。

在系统为单输入($m=1$)的情况下,在 $s=0$ 的附近,滑动模态存在的充分条件为

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s}_i < 0 \quad (2.736)$$

另外,系统在多输入的情况下,在 $s=0$ 的附近,滑动模态存在的条件可由李亚普诺夫直接法加以扩展给出,只要满足下面条件的连续可微函数 $v(x, s, t)$ 存在即可^[68,76]:

$$(1) v(x, s, t) > 0, \quad \text{for } s \neq 0$$

$$v(x, 0, t) = 0$$

$$\inf_{\|s\|=R} v = h_R, \quad \sup_{\|s\|=R} v = H_R$$

若 $R \neq 0$, 则 $h_R \neq 0$

(h_R 和 H_R 是正定,与 R 有关)

$$(2.737)$$

(2) 除去在 $s=0$ 上不存在 v 的时间微分的点以外,在球面 $\|s\|=R$ 上

$$\sup_{\|s\|=R} \dot{v} < 0 \quad (2.738)$$

3. 刚性臂的变结构控制

下面介绍刚性臂的变结构控制。刚性臂属于多输入系统。对多输入系统进行变结构控制系统设计,其难度在于如何设计滑动模态存在的输入。设计方法有两种:一种是把问题归结为单输入系统,然后设计控制律;另一种是利用李亚普诺夫函数直接设计控制系统。在前一种方法中,又可以分为利用等效输入或非线性反馈而归结为单输入系统控制问题来设计控制系统的方法^[72~74]和递阶控制法(hierarchy of control)^[71]两类。递阶控制法是使系统的状态依次达到各个输入的切换面来构成输入的方法,一旦系统的阶数较高,该设计方法就变得很复杂。

Yeng 和 Chen 提出了借助于刚性臂的物理修正、基于李亚普诺夫函数直接设计控制系统的方法^[75]。下面就对此设计法进行介绍。

众所周知,具有 n 个自由度的刚性臂的运动方程可用下式表示:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (2.739)$$

$$\dot{\theta}, \tau \in R^n$$

式中, τ 为 n 维的关节转矩(控制输入)向量; θ 为杆件在各个关节处形成的角度的 n 维向量; $M(\theta)$ 表示 $n \times n$ 的正定对称刚性矩阵; $h(\theta, \dot{\theta})$ 为离心力和哥氏力; $G(\theta)$ 为重力项的 n 维向量。

式(2.739)可以改写为下面的形式:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + K(\theta, \dot{\theta})(\theta) = \tau + w(\theta, \dot{\theta}) \quad (2.740)$$

式中, $H(\theta, \dot{\theta})$ 、 $K(\theta, \dot{\theta})$ 为 $n \times n$ 矩阵; $w(\theta, \dot{\theta})$ 为重力项和干扰的 n 维向量。

现在考虑 PTP 控制的情况。令目标关节角为 θ_d , 将式(2.731)的切换面选择为下面的形式:

$$s = 0 \quad (2.741a)$$

$$s = Ce(t) + e_i(t) = C(\theta - \theta_d) + \dot{\theta} \quad (2.741b)$$

其中,

$$C = \text{diag}[c_1, \dots, c_n] c_i > 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2.741c)$$

$\text{diag}[\quad]$ 表示对角矩阵。

接着计算(2.741)的时间微分,得到

$$\dot{s} = C\dot{\theta} + \ddot{\theta} \quad (2.742)$$

若在式(2.742)的两边乘上惯性矩阵,则得到

$$M\dot{s} = MC\dot{\theta} + M\ddot{\theta} = Q\dot{\theta} - K\theta + w + \tau \quad (2.743)$$

其中,

$$Q = MC - H \quad (2.744)$$

首先假设 $M\dot{s}$ 用下式表示:

$$M\dot{s} = \begin{bmatrix} -p_1 \text{sgn}(s_1) \\ -p_2 \text{sgn}(s_2) \\ \vdots \\ -p_n \text{sgn}(s_n) \end{bmatrix} = -As \quad (2.745)$$

其中,

$$A = \text{diag}[p_1(\theta, \dot{\theta}) \text{sgn}(s_1)/s_1, \dots, p_n(\theta, \dot{\theta}) \text{sgn}(s_n)/s_n] \quad (2.746)$$

$$p_n(\theta, \dot{\theta}) > 0, i=1, 2, \dots, n$$

$$\text{sgn}(s_i) = \begin{cases} 1, & s_i > 0 \\ -1, & s_i < 0 \\ 0, & s_i = 0 \end{cases} \quad (2.747)$$

继而考虑下式中的 $s' = 0$

$$s' = C'(\theta - \theta_d) + \dot{\theta} \quad (2.748a)$$

C' 是

$$CC' = -I \quad (I \text{ 是单位矩阵}) \quad (2.748b)$$

由此得到关系式

$$\begin{bmatrix} \theta - \theta_d \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} s \\ s' \end{bmatrix} \quad (2.749)$$

$$R = \begin{bmatrix} C & I \\ C' & I \end{bmatrix} \quad (2.750)$$

按照系统状态能够到达切换面且滑动模态存在的充分条件来设计输入, 考虑函数

$$v = s^T M(\theta, \dot{\theta}) s \quad (2.751)$$

借用式(2.749), 则式(2.751)可以改写为

$$v = s^T M(s, s') s \quad (2.752)$$

M 是关于 s, s' 的正定函数, 而 $v = (s, s')$, 只在 $s = 0$ 时才有 $v = 0$ 。把式(2.752)对时间进行微分, 再利用 M 的对称性, 可得下式:

$$\dot{v}(s, s') = (M s')^T s + s^T \dot{M} s + s^T (M s') \quad (2.753)$$

把式(2.745)代入后, 有

$$\dot{v}(s, s') = -2s^T (A - \dot{M}/2) s \quad (2.754)$$

如果可设计输入使 $(A - \dot{M}/2)$ 成为正定的话, 则 $\dot{v}(s, s')$ 为仅当 $s = 0$ 时才为零的半负定函数, 所以 $\dot{v}(s, s')$ 是李亚普诺夫函数, 满足系统的状态到达切换面 $s \rightarrow 0$, 而且滑动模态存在的充分条件。

为设 $(A - \dot{M}/2)$ 为正定, 有下式成立即可:

$$\frac{p_i \operatorname{sgn}(s_i)}{s_i} > \sum_{j=1}^n \left| \frac{\dot{M}_{ij}}{2} \right| \quad (2.755)$$

使式(2.755)成立的控制输入 τ , 可以按照满足由式(2.743)和式(2.745)构成的下式来进行设计:

$$Q\dot{\theta} - K\theta + w + \tau = \begin{bmatrix} -p_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ -p_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ \vdots \\ -p_n \operatorname{sgn}(s_n) \end{bmatrix} \quad (2.756)$$

令 Q^0, K^0 为 Q, K 的标称值, 实际上是

$$Q = Q^0 + \Delta Q \quad (2.757)$$

$$K = K^0 + \Delta K \quad (2.758)$$

不失一般性, 可假设这些参数满足下式:

$$|\Delta Q_{ij}| < \hat{Q}_{ij} \quad (2.759a)$$

$$|\Delta K_{ij}| < \hat{K}_{ij} \quad (2.759b)$$

$$|w_{ij}| < \hat{w}_{ij} \quad (2.759c)$$

$$|M_{ij}| < \hat{M}_{ij} \quad (2.759d)$$

设控制律为

$$\tau = Q^0 \dot{\theta} + K^0 \theta + u \quad (2.760)$$

则由式(2.756)可得

$$\Delta Q \dot{\theta} - \Delta K \theta + w + u = \begin{bmatrix} -p_1 \operatorname{sgn}(s_1) \\ -p_2 \operatorname{sgn}(s_2) \\ \vdots \\ -p_n \operatorname{sgn}(s_n) \end{bmatrix} \quad (2.761)$$

将式(2.761)分别对各个元素进行改写, 可得

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n (\Delta Q_{ij} \dot{\theta}_j - \Delta K_{ij} \theta_j) + w_i + u_i \\ = -p_i \operatorname{sgn}(s_i) \end{aligned} \quad (2.762)$$

若改写式(2.755), 则为

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(s_i) = \left[\sum_{j=1}^n (\Delta Q_{ij} \dot{\theta}_j - \Delta K_{ij} \theta_j) + w_i \right. \\ \left. + u_i \right] < -|s_i| \sum_{j=1}^n \left| \frac{\hat{M}_{ij}}{2} \right| \end{aligned} \quad (2.763)$$

满足上式的 u 为

$$\begin{aligned} u_i = -\operatorname{sgn}(s_i) \left[\sum_{j=1}^n (\hat{Q}_{ij} |\dot{\theta}_j| + \hat{K}_{ij} |\theta_j|) \right. \\ \left. + \hat{w}_i \right] - s_i \sum_{j=1}^n \frac{\hat{M}_{ij}}{2} \end{aligned} \quad (2.764)$$

把式(2.764)代入式(2.760)中, 控制输入即可由下式给出:

$$\begin{aligned} \tau_i = -\sum_{j=1}^n (Q_{ij}^0 \dot{\theta}_j - K_{ij}^0 \theta_j) - s_i \sum_{j=1}^n \frac{\hat{M}_{ij}}{2} \\ - \operatorname{sgn}(s_i) \left[\sum_{j=1}^n (\hat{Q}_{ij} |\dot{\theta}_j| + \hat{K}_{ij} |\theta_j|) + \hat{w}_i \right] \end{aligned} \quad (2.765)$$

实际上, 在执行变结构控制系统时, 由于式(2.730)的输入的切换存在延迟, 在切换面的附近会产生振动, 即所谓的震颤(chattering)(图 2.101)。对于机械系统的控制来说, 并不希望发生这种震颤, 因此面对实际应用, 人们提出了各种降低震颤的方法。在这些方法中, 有把输入中的 $[\operatorname{sgn}(\cdot)]$ 用其他函数代换的^[72, 75], 还有的把等效输入事先送入系统以便减低震颤^[73]等。

4. 欠驱动机械手的控制

近年来, 人们十分关注对非完整系统的研究, 针对车轮型移动机器人、航天机器人、带有非驱动关节的机械手等各种受到非完整约束的系统提出了构建控制系统的框架。这样的

系统一般称为欠驱动机械^[77],通过利用无法积分的速度约束和加速度约束,对于广义坐标数量大于控制输入的一类系统也能实现控制。例如,欠驱动机械手(具有非驱动关节的机器人),它的受控的运动自由度多于驱动器的数量,这样就能够减轻系统质量,实现节能要求。

在本小节中,特别说明一下具有非驱动关节的欠驱动机械手的控制。中村等^[78,79]指出,欠驱动机械手的动力学中包含二阶非完整约束,他们提出了双杆件水平欠驱动机械手的控制方法,并在该领域中率先进行了研究。另外,吉川等^[80,81]和荒井等^[82,83]对于水平欠驱动机械手的可控性进行了研究,提出了目标轨迹生成法及其收敛控制律。

另外,南等^[84]提出了利用可变周期有限规定控制方法,对三杆件欠驱动机械手实施控制的方案。在本小节中,作为例子我们介绍荒井等提出的反馈控制律^[83],以便具体地考虑水平三杆件欠驱动机械手的控制问题。

现在研究图 2.102 所示的水平三杆件欠驱动机械手。该欠驱动机械手在第 1 关节和第 2 关节处装有驱动器,第 3 关节为非驱动关节。因而,问题在于如何利用第 1 关节及第 2 关节的主动性来控制第 3 杆件的位置及姿态。在这里,仅特别关注具有非驱动关节的第 3 杆件,考虑它的控制方法。如图 2.102 所示,将第 3 杆件视为自由杆件模型,设杆件质量为 m ,刚性矩为 I ,则其运动方程式相对于基座坐标系 Σ_B 可表示为

$$f_\theta = -ml\ddot{x}\sin\theta + ml\ddot{y}\cos\theta + (I + ml^2)\ddot{\theta} \quad (2.766)$$

式中, f_θ 表示绕关节的转矩。在本例子中,由于第 3 关节为非驱动关节,因此 $f_\theta = 0$,则可以导出约束条件如下:

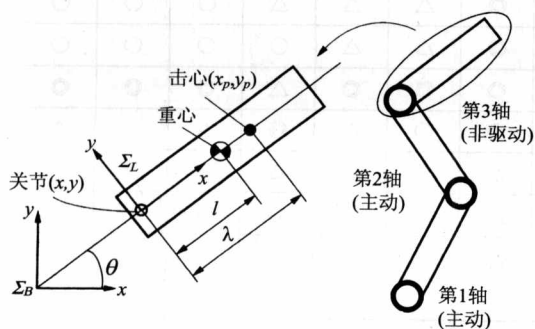


图 2.102 荒井等的自由杆件模型^[82]

$$-\ddot{x}\sin\theta + \ddot{y}\cos\theta + \lambda\ddot{\theta} = 0 \quad (2.767)$$

式中, $\lambda = l + I/(ml)$, 该约束条件为非完整约束。

现在考虑上述非完整约束三杆件欠驱动机械手的轨迹生成法。荒井等在文献^[82]中指出,通过求解从初始状态向目标状态转移的轨迹,可以证明该系统的可控性,再由该轨迹生成系统非驱动关节的运动。此时要考虑两个问题:一个问题是从自由杆件仅沿着杆件坐标系 Σ_L 的 x 轴实现平移运动;另一个问题是杆件仅绕击心实现旋转运动,在此基础上推导出实现这些运动所需要的非驱动关节的轨迹。然后,将求得的两种轨迹组合起来,实现任意两点之间的定位。

但是,由于该轨迹是以开环控制的前馈输入为前提的,面对实际机器人系统,由于非驱动关节部分的摩擦和自由杆件模型误差的影响,杆件的姿态往往会产生误差。所以,在设计反馈控制律时,应该考虑如何抑制误差的问题。

已经知道,光滑的状态反馈律无法使水平欠驱动机械手逐渐稳定地趋向于目标轨迹^[78]。荒木等的方案是将反馈律应用在目标轨迹的渐进稳定的实现上,而不是目标点上,从而避免了上述问题^[83]。

在荒井等的方法中,利用非驱动关节的平移加速度,设计了杆件位置和姿态的 3 坐标反馈控制,基于下述的概念构筑控制律。首先,让输入沿平行于非驱动关节目标轨迹的方向进行加减速,以实现平移轨迹。这时,由于杆件上作用有沿着加速度反方向的惯性力,若将它视为假想重力,则杆件运动能够被视为与振子或倒立振子的运动等效。因此,若利用剩余的输入构成与振子或倒立振子的控制系统相同的稳定反馈律,则杆件角度及关节位置将收敛在目标轨迹上。为了进一步实现旋转轨迹,可以将作用于杆件的离心力视为假想重力,依据与平移轨迹类似的方法构筑稳定反馈律。详细的反馈控制系统设计方法请参阅文献^[83]。

本小节介绍的非线性控制方法目前尚未在实际问题的应用方面取得明显的进展。但是,随着微处理器和器件等技术的进步,可以预计今后在欠驱动机器人领域的实用化方面

会取得进展。

小菅一弘 平田泰久

2.8 手臂机构的设计和评价

2.8.1 描述方法

关于手臂机构的设计,至今已有许多优秀的著作论及,参考这些著作便可以达到了解的目的。但是,能够清楚地掌握在实际中设计手臂时应该从哪里下手的设计者却不多。这想来是由于许多著作(也包括1990年版的手册)是以讲解手臂高深的知识为前提,以它的力学分析为中心展开叙述的缘故。在本节中,假设读者没有足够的时间通过对参考手册的阅读来获得高深的知识,试图更多地向读者直观地提示机器人的简易设计手段。为了利用简易手段进行正确的功能设计,要面对的问题仍然很多,但是如果允许设计中存在一定程度的误差,那么在多数情况下,在有限的时间中相关的知识将发挥充分的效能。换言之,我们姑且不研究这些知识会对工业机器人一类已经积累丰富应用经验的手臂进行改进设计产生什么影响,或者追求更高的功能来说,是否会有补益,至少它对于智能机器人一类小批量、多用途的手臂肯定是会非常有帮助的,这是因为它们仍处于研究的初始阶段。

评价像手臂这样复杂的机构的因素很多,目前的现状是并不存在一个统一的评价标准。例如,评价功能的一个指标是以操作范围大小为基准的扫描功能,关于这方面的

研究已经发表过一批优秀的研究成果。但是,很难说在理论上已经成功地将扫描范围与作业功能之间建立了关系。另外一个观点是对手臂机构可靠性的评价。若将可靠性的评价方法建立在可靠性工程学的基础之上,那么可以认为能够使配件在相当大的范围内具有体系化和标准化,但现状是,没有能提供实验样机手臂的数据,而现实是根据机器人制造企业的个别评价基准来实施的。因此,本节主要试图针对手臂的产品,建立更实用、更可靠的评价体系。

如上所述,在本节中虽然以重视实践的描述为主,但是考虑到这样做会产生一种缺乏理论性的倾向,因此对于简述部分(也包含与1990年版手册相关的部分),尽量注意介绍相关的文献,以便有助于开发人员建立自己的评价体系。

2.8.2 设计步骤

1. 设计流程

1) 设计的定义

人工设计的最好的方法是将目标和步骤全部用函数来表示,利用逆分析一下子求出全部解答。但是,如表2.7所示,影响手臂的设计因素极其复杂,很难将所有的目标和步骤都用公式表示^[1]出来。因而,为了使设计合理,只有一个可靠的方法,它如图2.103所示,在基于假设和经验建模并设计之后,验证设计模型的正确性。如果发现模型不正确,再返回到步骤的前期阶段,对模型进行修正,

表 2.7 手臂的设计因素

约束或评价函数 设计参数		操作度	总功率	手臂质量	总质量	成本	工作空间	抓取重量	最大速度/加速度	关节位移界限	挠曲	固有振动频率	精度
基本机构	自由度	◎	○	○	○	◎	◎	△	△	△	○	○	○
	关节种类	◎	○	○	○	◎	◎	△	△	○	○	○	○
	臂长	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎
	偏距	◎	△	△	△	△	◎	○	△	◎	△	△	△
内部机构	电机配置	△	◎	◎	◎	△	△	◎	△	△	△	△	△
	传动机构	△	△	◎	◎	◎	△	△	△	◎	◎	◎	◎
	减速器	△	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	◎	◎	◎
	电机	△	◎	◎	◎	◎	△	◎	◎	△	△	△	△

注:◎表示关系很大;○表示关系一般;△表示关系很小。

实际上这是以尝试的方法来实施设计。这种尝试性循环在所有的设计阶段都需要,而且应该根据具体情况按照不同的循环路径来实施。一个合理的设计是如何减少这种尝试循环次数。由于建模方法将影响设计的好坏,因此下面介绍几个建模的方法。

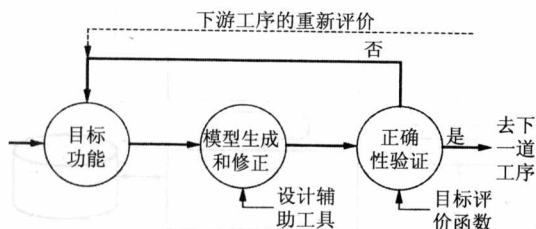


图 2.103 设计的基本方法

2) 简易设计及详细设计

图 2.104 给出了一个以手臂力学特性为重点的设计流程。近年来,出现了许多具有很强功能的设计工具,因此已经能够实现多个参数输入的直接设计了,不过这样的设计工具也存在以下问题:

① 模型复杂,不掌握熟练的专业知识和经验,就无法评价结果的准确性。

② 输入的参数多,不能预料其相互之间定性的和定量的影响。

③ 由于尝试循环包括的范围大,因此也无法预料应该在多大的范围内来修正模型。

鉴于此,本节推荐的方法如下:

① 以简单模型反复进行分析及评价为主,即开展近似设计。

② 若有必要,最终可以借助详细分析加以确认。

该方法能够达到设计所要求的精度,使作业尽早收敛。在有些场合,近似设计也许还能起到最终设计的效果,降低了设计成本。图 2.104 中的单自由度评价部分就相当于这种情况。

2. 作业功能的定义

手臂设计的目的在于完成所需要的作业。但是还没有建立一种方法,将作业功能描述成与手臂的物理参数直接相关。实际上,手臂本身直接参与作业的例子也不多,大多数场合是通过末端执行器或工具来实现作业的。可以从下述两个角度归纳手臂的模型:

① 着眼于末端对象在空间的移动功能:

自由度组成和杆件的长度。

② 着眼于末端质量在空间的移动功能:驱动器和机械刚性。

2.8.3 单自由度设计

1. 静态设计(简易设计)

1) 杆件设计

(1) 杆件长度 借助多自由度运动学分析方法,能够精确地计算出杆件的长度。在简易设计中,可以考虑手臂的变形为如图 2.105 所示的二维问题。众所周知,扫描二维空间需要 2 个自由度。如图 2.105 所示,假设在平面空间中有 2 根假想杆件,而且各个杆件具有运动方面的余量,足以覆盖扫描范围。例如,可以假设到达最远点时杆件的夹角为 120° 左右。在肩轴处将最大长度设为杆件长度,则问题可以变换为长度 l_L 的单自由度杆件问题。假想在肘轴处有上述假想杆件的轴长,于是问题就变化成为单自由度问题。通过类似处理,我们知道,在简易设计中把问题退化为单自由度问题,例如,将三维问题变换为向扫描平面投影的二维问题。

(2) 杆件质量 这里仅着眼于杆件的弯曲应力和变形,将杆件视为悬臂梁加以评价。在最初的设计计算中,将梁的质量设为零,根据求得的梁的截面 2 次矩和规定的形状来计算质量。然后,假设杆件的质量只集中在重心上,再进行计算,这样反复进行下去,直到误差收敛在允许范围内(通常计算几次即可收敛)。计算的顺序从末端杆件开始,计算越往肩轴一侧靠近,就逐步将末端一侧的杆件质量作为负载对待。由于简易设计时整个机构具有一定的余量,因此在设计结束后的详细分析中可以进一步优化,力图缩短杆件长度,使驱动器小型化并减轻其质量。

2) 关节机构和驱动器

(1) 电机选定 若杆件长度、杆件末端的负载、自重 m_L (kg) 所形成的负载已确定,则能够用式(2.768)来计算杆件根部(杆件关节部分)的转矩。

$$T_L = f_L l_L + m_L l_g \cdot g \quad (2.768)$$

式中, T_L 为负载转矩 (N·m); f_L 为杆件末端负载 (N); l_L 为杆件长度 (m); g 为重力加速度 (m/s^2); l_g 为杆件根部与重心的距离 (m)。

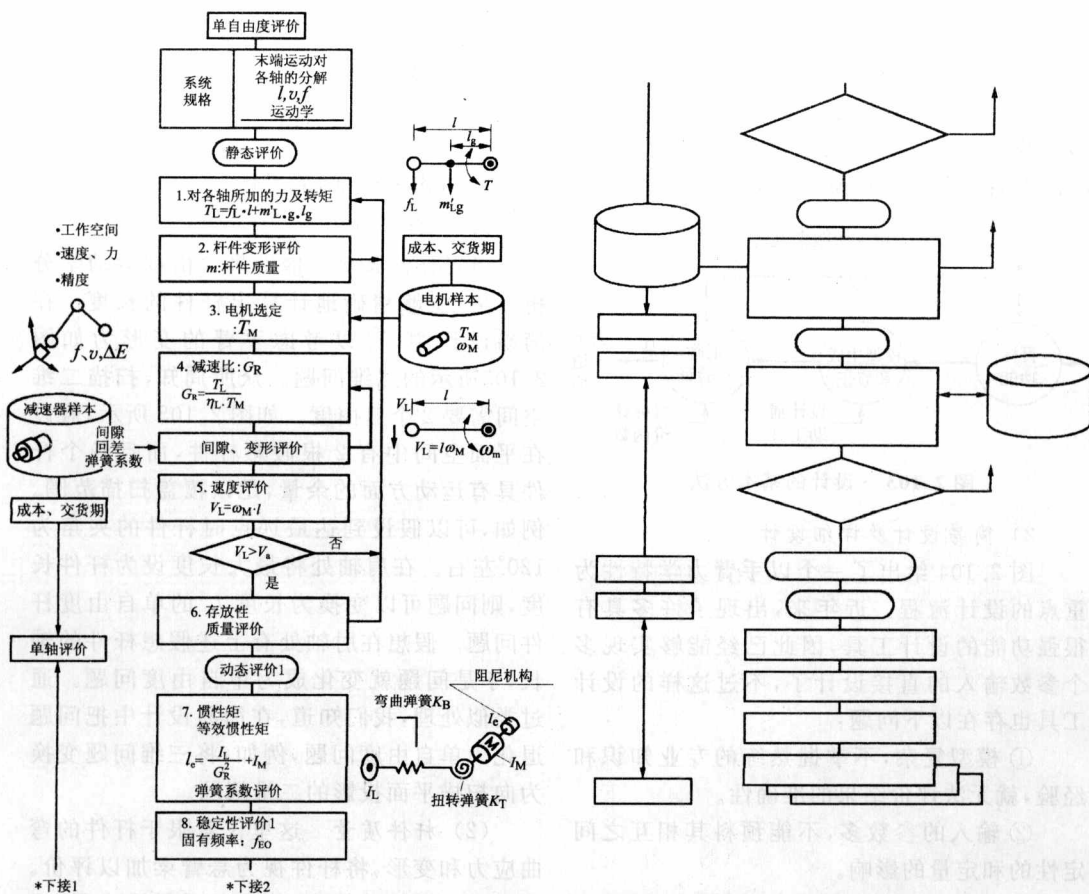


图 2.104 着眼于力学特性的手臂设计流程

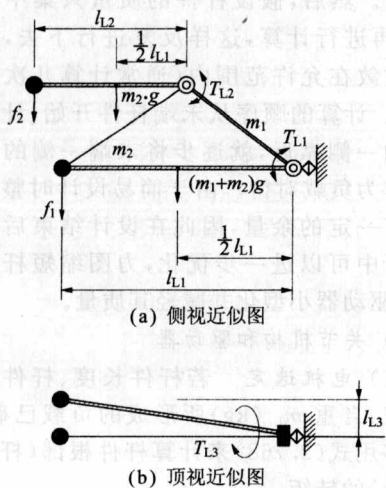


图 2.105 利用等效杆件退化为单自由度

式(2.768)中,如果需要从目标要求通过下式决定手臂末端所需要的速度,那么由于

$$P_E = f_L V_{EO}$$

$$P_M = \frac{P_E}{\eta_M}$$

式中, P_E 为手臂末端运动需要的功率(W); V_{EO} 为手臂末端速度(m/s); P_M 为要求电机的功率(W); η_M 为效率。

因此,若忽略杆件的质量,便可以计算出杆件关节部分的功率,即能够决定设计计算所需要的电机估算功率(额定输出功率)。以该值作为参考,从伺服电机样本中选定规定的电机。由于伺服电机具有以下特点:

- ① 电机转子惯性力小,能够实现快速响应。
- ② 最大输出功率和最大转矩比额定输出功率和额定转矩大出 2~3 倍。

因此,尽管电机是按照下述静态设计的条件选定的,但在动态设计中,只要没有特别的设计限制,一般也很少再作变更。选定电机后,便可以按照下式决定所需要的减速比:

$$G_L = \frac{T_L}{\eta_G T_M} \quad (2.769)$$

式中, T_M 为伺服电机额定转矩 ($N \cdot m$); η_G 为减速器效率; G_L 为减速比。

然后, 根据减速器样本, 并兼顾间隙和扭矩刚性(杆件末端的位移)等因素选定减速器。如果从市场上买不到合适的减速器, 那么可以设计专用的减速器, 再根据式(2.769)计算所得的减速比, 用式(2.770)计算末端速度:

$$V_L = \omega_M \times L_L \quad (2.770)$$

式中, V_L 为杆件末端速度 (m/s); ω_M 为杆件关节角速度 (rad/s)。

式(2.770)中, 若 $V_L < V_A$ (V_A 为由杆件长度换算的手臂末端速度), 则应该增大电机功率后, 再进行计算。若 $V_L > V_A$, 则可以认为选定电机和减速器(驱动器力学设计)的过程结束。但由于此前的设计忽略了驱动器的质量, 因此还必须对上述负载叠加被选定的驱动器的质量, 进行所谓的详细的实际设计。显然, 在该阶段绘图作业的效率是很低的, 有人提出了改进的途径, 所采取的措施是使用结构体系数进行关节质量评价的方法^[2]。

(2) 连续的杆件及驱动器的质量评价
从以转矩为横轴、以质量的对数为纵轴的坐标图中, 人们发现减速器和电机呈现出线性关系特性(图 2.106)^[3], 即

$$W_A = f(T_A) \quad (2.771)$$

式中, W_A 为驱动器的质量 (kg); T_A 为驱动器的额定转矩 ($N \cdot m$)。

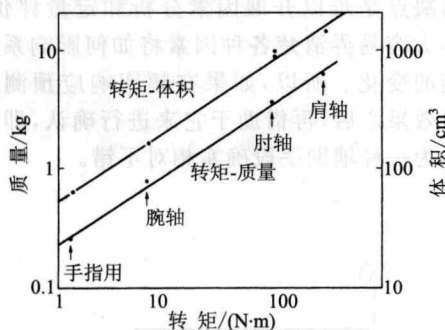


图 2.106 驱动器特性及质量

因而, 如果手臂末端部分的驱动器的质量一旦确定, 则

① 能够计算最末端杆件+驱动器(称为杆件关节)的近似质量 W_B 。

$$W_B = W_A(1 + km) \quad (2.772)$$

式中, $km = W_F/W_A$ 为结构体系数, W_F 为保持框架的质量 (kg)。

② 最末端部分的质量被确定后, 就可以将靠近根部杆件关节所承受的负载视为原负载加上最末端部分杆件关节的质量负载, 按照上述的步骤选定驱动器, 并对杆件关节质量进行初步概算。

③ 与上面的论述类似, 从末端向根部依次进行杆件关节的驱动器初步设计和杆件关节质量概算。附带说一下, 结构体系数也受驱动器性能和保持框架的设计的影响, 若采用最新的轻型驱动器, 则有

- $km=2\sim3$: 钢杆件。
- $km=0.5\sim1.0$: CFRP(碳纤维)杆件。
- 铝杆件处于这两者之间。由于铝的相对强度大, 而其相对刚性与钢差不多, 因此采用更接近于钢的数值为安全数值。

3) 关节机构设计

满足关节构造几何条件的最优设计结果也有多种多样的形状。不过, 除了特殊的场合以外, 大多数设计可以归纳为几种标准形式^[4]。如果能够有效利用这些标准形式, 就完全能够避免重蹈以往失败的老路, 比较轻松地完成具有高可靠性的设计。图 2.107 为弯扭组合轴的具有代表性的机构设计事例。这个标准结构设计从优先保证小型化的立场出发, 其特点是便于装配、维护、生成多种减速比、传动效率高、具有足够的电缆容纳空间和路径等, 尽管它稍微有点复杂。

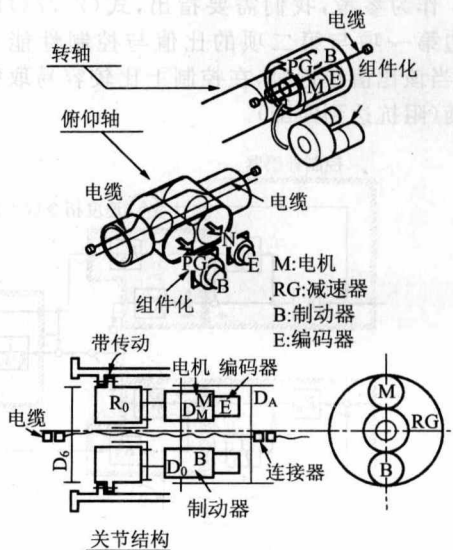


图 2.107 关节机构的标准化举例

2. 动态设计

1) 响应性的简易评价

(1) 机构建模 图 2.104 表示杆件关节机构的简易模型。通常,由于杆件的弯曲刚性比扭转刚性要大得多,因此在简易评价中即使忽略杆件的弯曲,误差也会很小。另外,在通常的减速器的情况下,如果不需要附加机械式阻尼器来达到衰减的目的,那么在多数情况下都允许忽略衰减特性。

(2) 固定振动频率的估计 在详细计算动态特性之前,需要先核对一下系统的固定振动频率 f_{EO} 。如果杆件关节机构的固有振动频率 f_{EO} 低于所要求的响应频率(响应速度) f_{EA} ,或者两者相差不大,那么仅借助于通常的控制方法就很难实现稳定的控制。因此,固有振动频率必须设计得比所要求的响应频率要高得多。大致标准为最低是

$$f_{EO} > 2 \sim 3 f_{EA} \quad (\text{如有可能,最好} \geq 5)$$

下面给出简易杆件模型固有振动频率的求计算方法:

$$I_e = I_M + \sum \frac{I_{Li}}{G_{Ri}^2} \quad (2.773)$$

$$f_{EO} = \sqrt{\frac{K_T}{I_e}} \quad (2.774)$$

式中, I_e 为等效惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); I_{Li} 为除了电机以外的机构各个部分的惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); G_{Ri} 为上述机构与电机轴的减速比; I_M 为电机的惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); K_T 为驱动器的扭矩刚性 ($\text{N} \cdot \text{m/rad}$)。

作为参考,我们需要指出,式(2.773)的右边第一项与第二项的比值与控制性能相关,当该比值接近时,在控制上比较容易取得平衡(阻抗达到匹配)。

2) 响应性的详细评价

从本步骤往后,评价工作就很难通过手工计算来完成了,必须借助于适当的计算机设计工具。因而,上述介绍有时仅仅是通过作图来进行。在有代表性的计算机设计工具中^[5],机械模型将被转换为传递函数后进行评价。图 2.108 为单自由度杆件关节的传递函数的例子。

频率响应 图 2.109 为经过计算机分析后传递函数转化成的伯德图。从伯德图可以看出,它包含固有振动频率估计在内的详细动态特性。关于伯德图,在本篇第 4 章 4.1 节中将详细加以叙述,因此在这里将有关的说明省略。为了达到稳定的控制,杆件动作(在响应频率以内)必须满足下述条件:

① 增益 3dB 衰减。

② 相位 180° 以内(实际上是 90° 以内,考虑到安全,则推荐使用 45°)。

如果响应的快速性不够,为了提高驱动器系统的刚性,必须进行重新设计。

此外还有借助于奈奎斯特图、过渡响应评价的方法,以及使用实际输入的仿真方法等。无论采用任何方法,若能够生成传递函数,那么评价就会变得比较容易实施。

3) 过渡响应评价及频率响应评价

过渡响应的直观性好,能够通过机械仿真来证实,因此这种方法经常被采用。不过,它的缺点是难以开展因素分析和定量评价,即不容易弄清楚各种因素将如何影响系统性能的变化。所以,如果在频率响应预测了设计效果之后,再借助于它来进行确认,即将它作为一种辅助手段确实相对不错。

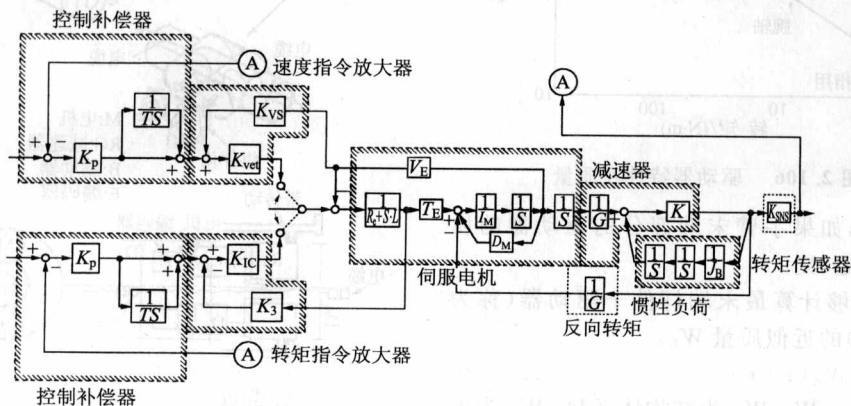
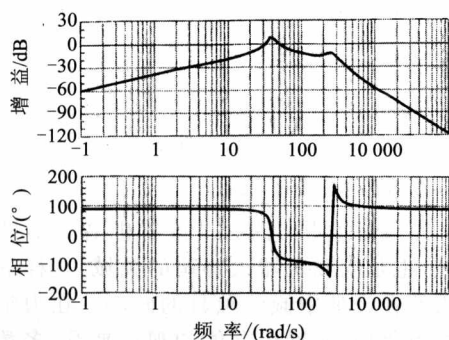
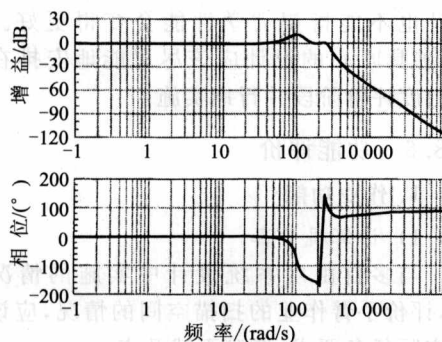


图 2.108 单自由度系统的传递函数举例



(a) 速度指令(开环)



(b) 速度指令(闭环)

图 2.109 利用伯德图进行评价

2.8.4 多自由度的评价

用于单自由度场合的评价方法比较直观、简单,在多数情况下该方法也足够了。但在有些场合,用户强烈地要求开展下述设计工作,即使花费时间和成本也在所不惜:

① 机构优化。

② 详细的运动评价。

这时,就必须根据上面得到的设计结果,进行必需的自由度分析。

1. 多自由度运动学

本篇的第2.2节已经详细地叙述了手臂末端的运动,并进行了各个杆件关节的几何学关系分析。借助于这样的运动学分析,可以对手臂末端在规定的空间内进行扫描(图2.110),将此时各杆件关节的力学关系与在单自由度系统中求得值加以比较。

关节的角速度和转矩 例如,使用齐次变换方式,于是借助于雅可比矩阵可以得到如下所示的关系(参阅本篇2.2节):

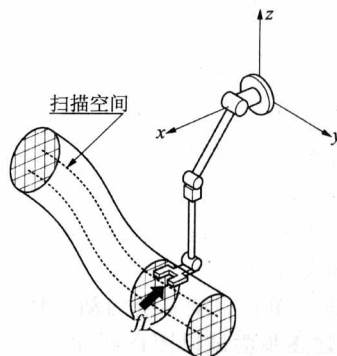


图 2.110 多自由度系统评价的扫描方式

$$\theta = \int J^{-1} \dot{x} dt$$

$$\dot{\theta} = J^{-1} \dot{x}$$

$$\ddot{\theta} = J^{-1} (\ddot{x} - \dot{J} \dot{\theta})$$

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + B \dot{\theta} + D(\dot{\theta}) + g(\theta)$$

式中, θ 为关节角 (rad); x 为末端位置 (m); $M(\theta) \ddot{\theta}$ 为手臂的惯性力项 (N·m); $C(\theta, \dot{\theta})$ 为离心力和哥氏力项 (N·m); $B \dot{\theta}$ 为黏性摩擦项 (N·m); $D(\dot{\theta})$ 为动摩擦力项 (N·m); $g(\theta)$ 为重力项 (N·m)。

我们来考察下列关系:

① 关节的动作范围是否在设计的允许工作空间内?

② 关节的角速度是否在驱动器额定速度的范围内?

③ 关节的转矩是否在驱动器额定转矩的范围内?

如果在上述关系中出现了不满足的关节,则返回到单自由度系统,再进行设计。但是,如果单自由度系统的设计是适当的,那么修正的范围是很小的,即很容易完善设计。

2. 多自由度的动力学(参阅本篇2.3节)

多自由度系统的动力学中包括有:

① 仅考虑杆件的力学,加以评价。

② 将杆件与驱动器的动态特性组合起来加以评价。

经验证明,①适用于D-D驱动(驱动器具有足够大的刚性),或者适用于如柔性臂那样杆件刚性比较低的情况,而一般的手臂需要依据②来评价。但是,如果将杆件和驱动器系统的传递函数和运动学组合起来加以分

析,问题就会变得非常复杂,再考虑到建模时的种种困难原因(摩擦、加工误差、装配误差等),甚至分析精度也将会大打折扣,尽管不是不能进行分析。因此,比较现实的办法是将问题分解开来,对每个问题进行评价。比较实用的做法如下:

① 把依据杆件运动学计算的关节的外部条件作为设计目标。

② 进行单自由度系统的动态特性评价。然后,通过逐步尝试以图达到优化。

3. CAE 及 CAD 化

一旦涉及动态特性的评价,特别是多轴动态特性分析,必须借助于计算机工具。具有代表性的计算机工具有下列程序:

Mathematica^[6] 数学公式处理程序

MATLAB^[5] 控制系统设计程序

另外,大学研究室开发的一些开放式工具中也有很有效的程序。无论如何,在该阶段的评价中,设计者的投入会很多,因此必须关心费用的投入效果。再有,一旦开发出计算机软件,其实它们也是能够广泛地应用于对其他机械的评价,因此对于设计者来说,开发一个包含单自由度简易设计在内的综合设计工具应该是一个优先的选择。

2.8.5 非力学条件方面的设计

1. 电气系统及布线

只要能够满足力学特性,手臂的结构当然是越紧凑越好。随着机器人小型化的进程,手臂内部空间变得狭窄起来,在多数情况下几乎失去了布线空间。越是到手臂的根

部,布线数量越多。在这种情况下是不允许勉强布线的,因为断线或线之间的干扰会显著降低手臂的可靠性。因而,必须在机器人的力学设计阶段就同步考虑布线的问题,积极引入节省布线的方法(图 2.111)。

2. 独具匠心的设计

不仅是娱乐机器人,智能机器人活跃的领域,也是人和机器人协调的领域,这样的领域需要在设计中倾注独具的匠心。在力学设计结束之后,从确保功能的观点来看,多数情况下是不允许再改变设计的,即使能够改变设计也不能指望力学性能会变得更好。因此,独具匠心的设计应该尽可能地安排在多自由度评价阶段并行地实施。

2.8.6 功能评价

1. 作业功能

1) 计算机仿真

与多自由度系统设计中实施的情况相同,评价手臂作业的扫描空间的情况,应该对照实际任务要求,考察下述几点:

① 关节可动角度的余量。

② 各个关节相对于手臂末端误差的灵敏度。

③ 各个关节的转矩余量。

虽然余量和灵敏度越大越好,但为了应对效率或摩擦等的不确定因素,至少要确保在 20% 左右。该阶段如果差距较大,应该重新进行设计。

2) 特性实验验证

实验验证的目的在于掌握是否达到目标

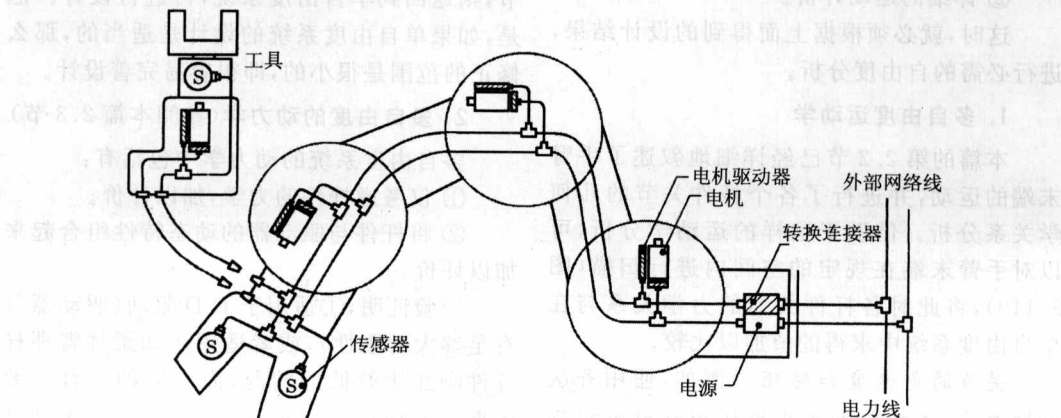


图 2.111 节省布线型手臂的概念

规格,进而可以分析与设计评价值发生差异的原因何在。

(1) 单自由度系统验证 ①将关节固定,在手臂末端加负载,评价末端的变形及误差(评价杆件和驱动器的间隙和刚性)。

②动态评价。测试每个轴关节的频率响应。

(2) 多自由度评价 ①静态评价。依次改变各个关节的数据,用三维测试仪器测量和评价末端的精度。比较这些数据与计算机仿真的误差灵敏度,找到解决问题的措施。

②动态评价。多自由度机构的动态行为比较难以测量。因而,一般按照实际作业的功能来进行评价。

3) 实际作业验证

目前并没有针对实际作业的评价制订统一的标准,一般都希望根据可靠性工程尽量科学地进行验证。实际作业验证能够节约后续改进设计和类似设计所需要的工作量,同时可以有效地用于预防故障的发生。

2. 分析评价

目前,分析评价已经建立起适当的体系,因此这个环节能够提供十分有效的信息。为了理解分析评价的具体方法,可能需要花费相当大的工作量,不过它也有优点,就是没有经验的人按照既定的步骤也能够顺利地完评价过程。下面简单地介绍旧版《机器人技术手册》中介绍的方法。

1) 操作性的评价

(1) 利用雅可比矩阵的机构评价^[8,9]

根据雅可比矩阵求出可操作度,用它的大小进行评价。可操作度越大,越能进行稳定的作业。

(2) 利用广义惯性椭圆体的机构评价^[10]

利用手臂末端生成的特定的椭圆体来评价可操作度。椭球体越接近于球体,则全方位的操作性越好。图 2.112 给出了生成广义椭球体的例子。

(3) 利用动态可操作度的评价^[11~13] 根据多自由度系统的运动方程式,定义动态可操作度来评价操作性。

2) 误差的机构分析评价^[14~23]

首先根据 Denavie-Hartenberg 方法和修正方法,对多自由度系统进行机构建模。若采用 Chu-Haur、Wu 及 Hsu、Evert 的方法针

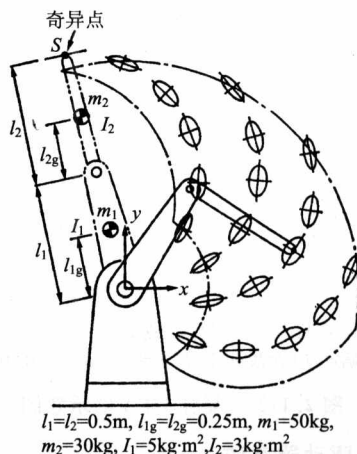


图 2.112 广义惯性椭球体机构评价的例子

对该模型进行分析,则能够借助于数学公式来评价手臂的参数与误差之间的关系^[24]。

3) 误差

如果设计能够依据解析的方法来实现,那么就允许通过数学公式对完成的手臂设计进行评价,这种评价将是十分有效的。不过其缺点在于,当发现评价的结果有问题时,直观上并无法判断要修正哪里和如何进行修正。修改必须经历反复试凑的过程才能完成。因而,比较合理的做法是根据设计成本积极借助于适当的工具,以及对照单自由度系统的设计进行评价和修正。

2.8.7 可靠性评价

1. FTA 分析

以往,评价可靠性的办法是在模仿的使用条件下,反复进行手臂的耐久试验,检查它是否可靠地执行了动作命令。不过,这种方法对于多用途手臂不太适用。另外,由于试验往往是在最苛刻的条件下进行,因此还要求机器人具有可靠性方面的余量。有效的一种实验方法是将下述的方法组合起来,即将 ①根据设计设想的故障方式树结构;②根据故障方式推定的原因树结构复合起来,开展所谓的复合故障树形分析(复合 FTA: Fault Tree Analysis)。图 2.113 给出了示意图。根据树的结构,重要部分的试验数据需要做统计处理,通过这种方法完成的可靠性评价结论可以应用到其他设计中去。

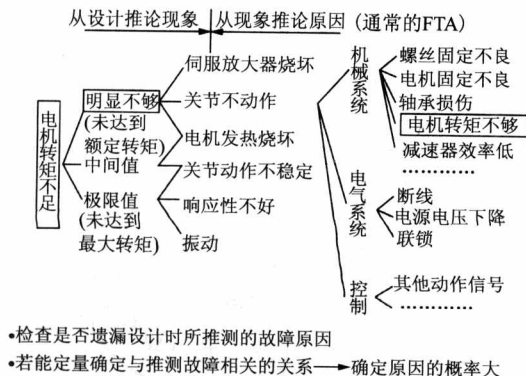


图 2.113 复合 FTA 的示意图

2. 驱动器系统

保证手臂可靠性的主要因素在于驱动器的可靠性。必须把它的额定值选取得足够大,要满足以下要求:

- ① 有过载余量。
- ② 掌握可靠性恶化的原因,按照标准化、通用化开展设计。
- ③ 对伺服电机等类似产品进行验证(样机或批量产品)。

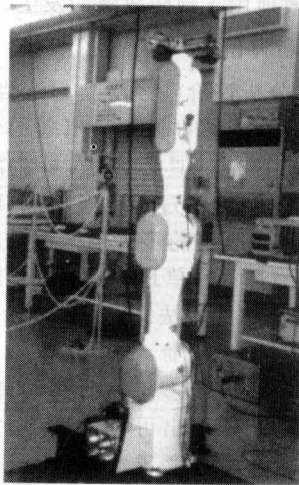
满足了这些要求,手臂在使用过程中就不会发生故障(表 2.8,图 2.114)。

表 2.8 伺服放大器的验证流程举例

分类	试验及目的	
驱动装置单元测试	功能检查	内部电源检查
		电源电压检测电路检查
		布线系统等检查
	环境评价试验	对电源电压变动的适应性检查
		对阶跃载荷变动的低速性检查
		低速的平稳旋转检查
		冲击电流抑制电路检查
		防止冲击电路验证
		安全确认检查(1500V,1min)
驱动装置单元测试	环境评价试验	装置的耐环境性能确认检查(高温)
		装置的耐环境性能确认检查(低温)
		驱动装置整体的温度、湿度适应性检查
		外部干扰适应性检查
		驱动装置整体的抗振检查
	出厂检查	电路全部功能的分项检查
		初始故障的隔离

续表 2.8

分类	试验及目的	
组合测试	性能评价试验	电流转矩特性测量
		空载频率特性测量
		阶跃响应特性测量
		静态特性测量
		温升试验
		转矩、转速特性测量
		噪声测量
		漏电流测量
追加试验项目	极限性能验证及安全性验证	电压变动试验
		过载运转试验
		极限温度试验
	耐久试验	负载连续试验

图 2.114 PA-10 的验证试验
(三菱重工业公司)

3. 布线系统

电气系统电路、传感器、布线系统的故障是随机发生的,比较难以处理,因而要进行下面的各项检查:

- ① 在最大工作空间内的试验。
- ② 在最大负载条件下的试验。
- ③ 高温、低温试验和高、低温循环试验。

这些试验的目的在于通过强制性手段使故障暴露出来,是进行可靠性评价的有效方法。

2.8.8 面向新的设计

综上所述,简易设计是将相互影响的复杂设计因素去繁化简为简化因素而进行设计。实际上,由于驱动器性能的不断稳定和改进,多自由度手臂的设计方法已经相当成熟。目前,已经可以借助于 CAE/CAD 实现下列事项:

- ① 杆件的运动学、变形、精度评价。
- ② 标准安装形式的驱动器结构选取。
- ③ 基于结构体系数进行质量评价。
- ④ 单自由度系统的动态特性评价。
- ⑤ 多自由度系统的动力学特性评价。
- ⑥ 操作性评价。

前面已经提及,如果驱动系统能以传递函数的形式表现出来,那么设计过程就能够借助于一部分的分析工具来进行处理和完成。进一步说,如果能够将所有分析工具整合在一起,集成一套十分易于掌握的设计工具的话,对初学者来说无疑是一件幸事。该项工作正在脚踏实地地向前推进,重要的是设计者们要不断地注意新的设计工具的进展信息。

最后附带说明一下,本书的机构分析一节部分地援引了本手册 1990 年版本的内容及数据,是采用了本手册 1990 年版的作者之一远山先生的业绩。

大道武生

参考文献

- 2.1 手臂机构
- [1] 加藤一郎:人間工学—工学の人間学—,日本放送出版協会(1988)
- [2] D. C. H. Yang: Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint, Trans. Of the ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design (1984) pp.191-198
- [3] 高野政晴:ロボット機構学の基礎,コンピュータール, No.9, コロナ社(1985)
- [4] 内山勝:人工の手の運動制御に関する研究,第1報,日本機械学会論文集, Vol.45, No.391 (1979) pp.314-322
- [5] 菅野重樹ほか:情報処理作業を目的とした自律型ロボットの4肢システムの構成,日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4 (1984) p.339-353
- [6] 牧野 洋:SCARA ロボットの開発,精密機械, Vol.48, No.3 (1982) p.92
- [7] H. Asada et al.: Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors, 11th ISIR (1981) pp.629-636
- [8] 菅野重樹ほか:ワイヤ駆動方式を用いた関節の運動制御,第6回日本ロボット学会学術講演会(1988) pp.59-60
- [9] 岡田徳次:ワイヤを用いた人工指の力制御,計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.2 (1978) pp.49-56
- [10] 高瀬国克ほか:トルク制御機能を持つ関節形マニピュレータ,電子記述総合研究所報, 37-3 (1973)
- [11] 伊藤英世:順応型マニピュレータの開発,機械技術研究所報告, No.120 (1982)
- [12] 広瀬茂男:生物機械工学,工業調査会(1987)
- [13] L. Kersten: The Lemma Concept: A New Manipulator, Mechanism and Machine Theory, No. 12 (1977) pp.77-84
- [14] 日経メカニカル (1982) p.60 p.
- [15] 森田寿郎ほか:高運動性能マニピュレータのための機械的3次元自重補償機構の開発,ロボティクス・メカトロニクス講演会(2002)
- 2.2 手臂运动学
- [1] R. P. Paul: Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, The MIT Press (1981) (ロボット・マニピュレータ〈数学的基礎,プログラミング,および制御〉(吉川恒夫訳),コロナ社(1984))
- [2] S. ムシュタバ, R. ゴールドマン(金山裕,坪内孝司訳):ロボット言語 AL, 総研出版(1984)
- [3] 内山勝, ピエール・ドシェ:両手ロボットの対称型運動学と非マススレーブ協調制御,日本ロボット学会誌, Vol.7, No.1 (1989) pp.19-30
- [4] J. Denavit and R. S. Hartenberg: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on Matrices, Trans. ASME, J. of Applied Mechanics, Vol.22, No.2 (1955) pp.215-221
- [5] R. S. Hartenberg and J. Denavit: Kinematic Synthesis of Linkages, McGraw-Hill (1964)
- [6] 内山勝:人工の手の運動制御に関する研究(第1報,特異点を考慮した協調運動の計算),日本機械学会論文集(C), Vol.45, No.391 (1979) pp.314-322
- [7] 内山勝:パラレルマニピュレータの機構と特性,日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6 (1992) pp.715-720
- [8] J. P. Merlet: Parallel Robots, Kluwer Academic Publishers (2000)
- [9] J. M. Hollerbach: A recursive Lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-10, No.11 (1980) pp.730-736
- [10] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: On-line computational scheme for mechanical manipulators, Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, No.2 (1980) pp.69-76
- [11] Y. Nakamura: Advanced Robotics, Redundancy and Optimization, Addison-Wesley Publishing Company (1991)
- [12] D. N. Nenchev: Redundancy resolution through local optimization: A review, J. of Robotic Sys-

- tems, Vol.6, No.6 (1989) pp.769-798
- [13] D. E. Orin and W. W. Schrader : Efficient computation of the Jacobian for robot manipulators, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.3, No.4 (1984) pp.66-75
 - [14] 中村仁彦, 横小路泰義, 花房秀郎, 吉川恒夫 : ロボットマニピュレータの運動学と動力学の統合化計算, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.5 (1987) pp.491-498
 - [15] D. E. Whitney : Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, *IEEE Trans. on Man-Machine Systems*, Vol.MMS-10, No. 2 (1969) pp.47-53
 - [16] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul : Resolved acceleration control of mechanical manipulators, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.AC-25, No.3 (1980) pp.468-474
 - [17] R. Featherstone : Position and velocity transformations between robot end-effector coordinates and joint angles, *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 2, No.2 (1983) pp.35-45
 - [18] M. Takano : A new effective solution for inverse kinematics problem (synthesis) of a robot with any type of configuration, *J. of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*, Vol. 38, No.2 (1985) pp.107-135
 - [19] S. Elgazzar : Efficient kinematic transformation for the PUMA 560 robot, *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol.RA-1, No.3 (1985) pp.142-151
 - [20] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki and M. Uchiyama : Singularity-consistent parameterization of robot motion and control, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.19, No.2 (2000) pp.159-182
 - [21] 宮崎友宏, 萩原史朗 : 中間座標を用いたロボットの高速度座標変換法, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.3 (1987) pp.268-273
 - [22] D. L. Pieper : The Kinematics of Manipulators under Computer Control, Ph.D. Thesis, Stanford University (1968)
 - [23] W. Khalil and E. Dombre : Modeling, Identification and Control of Robots, Hermes Penton Ltd. (2002)
 - [24] 叶俊夫 : ロボット機構のCADに関する研究, 東北大学精密工学科卒業論文 (1986)
 - [25] V. J. Lumelsky : Iterative coordinate transformation procedure for one class of robots, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-14, No.3 (1984) pp.500-505
 - [26] 吉川恒夫 : ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988)
- ### 2.3 手臂力学
- [1] H. Asada and J. J. E. Slotine : Robot Analysis and Control, John Wiley & Sons, Inc. (1986)
 - [2] 川崎晴久 : ロボットアームの動力学計算法, 計測と制御, Vol.25, No.1 (1986) pp.23-29
 - [3] M. E. Kahn : The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains, Stanford Artificial Intelligence Project Memo, AIM-106 (1969)
 - [4] J. M. Hollerbach : A recursive Lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity, *IEEE Trans. Vol. SMC-10, No.11 (1980) pp.730-736*
 - [5] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul : On-line computational scheme for mechanical manipulators, *Trans. of ASME J. of DSCM*, Vol. 102 (1980) pp.69-76
 - [6] W. Khalil et al. : A New Geometric Notation for Open and Closed-Loop Robots, *Proc. IEEE Conf. On Robotics and Automation (1986) pp.1174-1180*
 - [7] J. Denavit et al. : A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *ASME J. of Applied Mechanics*, Vol.22 (1955) pp.215-221
 - [8] 川崎晴久 : ロボット工学の基礎, 森北出版 (1991)
 - [9] F. Ghorbel, B. Srinivasan and M. W. Spong : On the uniform boundedness of the inertia matrix of serial robot manipulators, *Journal of Robotic Systems*, Vol.15, No.1 (1998) pp.17-28
 - [10] S. Arimoto and F. Miyazaki : Stability and Robustness of PID Feedback Control for Robot Manipulators of Sensory Capability, *Robotics Research, First Intentional Symposium* (eds. M. Brady and R. P. Paul), MIT Press (1984) pp.783-799
 - [11] H. Kawasaki and K. Nishimura : Terminal-link parameter estimation method for serial manipulator arm, *Preprints of Symposium on Robot Control '85 (1985) pp.213-218*
 - [12] C. G. Atkeson, C. H. An and J. M. Hollerbach : Rigid Body Identification for Manipulators, *Proc. of 24th Conf. On Decision and Control (1995) pp. 996-1002*
 - [13] M. W. Walker and D. E. Orin : Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanisms, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.104 (1982) pp.205-211
 - [14] C. J. Li : A new method of dynamics for robot manipulators, *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernet. Vol. SMC-18, No.1 (1988) pp.105-114*
 - [15] A. Fijany and A. K. Bejczy : An Efficient Method for Computation of the Manipulator Inertia Matrix, *Proc. IEEE Conf. Robotics Automat. (1989) pp.1366-1373*
 - [16] S. Lin : A new composite body method for manipulator dynamics, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 8, No.2 (1991) pp.197-219
 - [17] K. W. Lilly and D. E. Orin : Alternate formulations for the manipulator inertia matrix, *The Int. Jour. of Robotics Research*, Vol.10, No.1 (1991) pp.64-74
 - [18] H. Kawasaki, A. Murata and K. Kanzaki : An efficient algorithm for generating manipulator inertia matrix using the minimum set of dynamics parameters, *Journal of Robotic Systems*, Vol.13, No.5 (1996) pp.261-273
 - [19] S. K. Lin and C. J. Fang : Efficient formulations for the manipulator inertia matrix in terms of minimal linear combinations of inertia parameters, *Journal of Robotic Systems*, Vol.16, No.12 (1999) pp.679-695
 - [20] Y. Nakamura and M. Ghodoussi : Dynamic com-

- putation of closed-link robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.5, No. 3 (1989) pp.294-302
- [21] 中村仁彦: パラレルメカニズムの動力学, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6 (1992) pp.709-714
- [22] N. H. McClamroch and D. Wang: Feedback stabilization and tracking of constrained robots, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.33, No.5 (1988) pp.419-426
- #### 2.4 手臂的控制
- [1] M. Takegaki and S. Arimoto: A new feedback method for dynamic control of manipulators, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102 (1981) pp.119-125
- [2] 宮崎文夫, 有本卓: ロボットマニピュレータのためのフィードバック制御則の安定性とロバスト性に関する考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.1 (1985) pp.78-83
- [3] 竹垣盛一, 有本卓: マニピュレータの作業座標フィードバック制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.17, No.5 (1981) pp.582-588
- [4] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: Resolved acceleration control of mechanical manipulators, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-25, No.3 (1980) pp.468-474
- [5] J. S. C. Yuan: Closed-loop Manipulator control using quaternion feedback, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.4 (1988) pp. 434-440
- [6] J. Funda, R. H. Taylor and R. P. Paul: On homogeneous transforms, quaternions, and computational efficiency, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No.3 (1990) pp.382-388
- [7] D. E. Whitney: Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, IEEE Trans. on Man-Machine Systems, Vol.MMS-10, No.2 (1969) pp.47-53
- [8] D. E. Whitney: The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.93 (1972) pp.303-309
- [9] J. J. Craig: Introduction to Robotics, Addison-Wesley (1986)
- [10] R. Bach and R. Paielli: Linearization of attitude-control error dynamics, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.38, No.10 (1993) pp.1521-1525
- [11] M. Brady: Trajectory Planning, in Robot Motion (eds. M. Brady et al.), MIT Press (1982)
- [12] R. P. Paul: Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, AIM 177 (1972)
- [13] R. P. Paul: Robot Manipulators; Mathematics, Programming and Control, MIT Press, Cambridge, Mass. (1981) (ロボット・マニピュレータ, 吉川訳, コロナ社 (1984))
- [14] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: Resolved-acceleration control of mechanical manipulators, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-25, No.3 (1980) pp.468-474
- [15] A. K. Bejczy: Robot Arm Dynamics and Control, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, TM 33-669 (1974)
- [16] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: On-line computational scheme for mechanical manipulators, Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102 (1980) pp.69-76
- [17] I. Horowitz: Synthesis of Feedback Systems, MIT Press, Cambridge, Mass. (1963)
- [18] T. Sugie, T. Yoshikawa and T. Ono: Robust controller design for robot manipulators, Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.110, No.3 (1988) pp.94-96
- [19] M. J. Chen and C. A. Desoer: Algebraic theory for robust stability of interconnected systems; Necessary and sufficient conditions, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-29, No.6 (1984) pp. 511-519
- [20] E. Freund: Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators, Int. J. Robotics Research, Vol.1, No.1 (1982) pp.65-78
- [21] 吉川: マニピュレータの多変数制御, 日本ロボット学会誌, Vol.1, No.2 (1983) pp.10-15
- [22] A. Liegeois: Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multi-body mechanisms, IEEE Trans., Vol.SMC-7, No.12 (1977) pp. 868-871
- [23] Y. Nakamura, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: Task-priority based redundancy control of robot manipulators, The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.2 (1987) pp.3-15
- [24] T. Yoshikawa: Foundations of Robotics, MIT Press, Cambridge, Mass. (1990)
- [25] Y. Nakamura: Advanced Robotics, Redundancy and Optimization, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1991)
- [26] T. Yoshikawa: Basic optimization methods of redundant manipulators, Laboratory Robotics and Automation, Vol.18 (1996) pp.49-60
- [27] 吉川: ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988)
- [28] T. Yoshikawa: Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy, Robotics Research: The First International Symposium (eds. M. Brady and R. Paul), MIT Press, Cambridge, Mass. (1984) pp.735-747
- [29] T. Yoshikawa: Manipulability of robotic mechanisms, The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.2 (1985) pp.3-9
- [30] D. E. Whitney: Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, Proc. 1985 IEEE Conference on Robotics and Automation (1985) pp.262-268
- [31] H. Inoue: Computer controlled bilateral manipulator, Bull. of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.14-69 (1971) pp.199-207

- [32] R. P. Paul : Modeling, Trajectory Calculation, and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford University, Artificial Intelligence Laboratory, AIM 177 (November, 1972)
- [33] 吉川：ロボットにおける力制御の現状と将来, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6 (1991) pp.746-750
- [34] D. E. Whitney : Force feedback control of manipulator fine motion, ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.99 (1977) pp.91-97
- [35] M. H. Raibert and J. J. Craig : Hybrid position/force control of manipulators, Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102 (1981) pp.126-133
- [36] N. Hogan : Impedance control : An approach to manipulator : Part 1-3, ASME, Journal of DSMC, Vol.107 (1985) pp.1-7
- [37] 小菅：力制御法の分類と制御システムの設計法, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6 (1991) pp.746-750
- [38] 吉川：ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出—, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.6 (1985) pp.531-537
- [39] 吉川：ロボット制御基礎論, コロナ社 (1988)
- [40] 計測自動制御学会編：ロボット制御の実際, コロナ社 (1997)
- [41] S. D. Eppinger and W. P. Seering : On Dynamic Problems in Robot Force Control, Proc. 1989 IEEE Conference on Robotics and Automation (1989) pp.392-397
- [42] Hollis et al. : A Six Degree of Freedom Magnetically Levitated Variable Compliance Fine Motion Wrist, Proc. ISRR (1987) pp.241-248
- [43] C. Revoulet et al. : Use of an Active Compliant Device for Industrial Applications, Proc. SIFIR' (1989) pp.80-85
- [44] S. Iwaki : The optimal location of electromagnets in multiple degree-of-freedom magnetically suspended actuators, ASME, Journal of DSMC, Vol.112 (1990) pp.690-695
- [45] J. Duffy : The fallacy of modern hybrid control theory that is based on orthogonal complements of twist and wrench spaces, J. of Robotics System, Vol.7, No.2 (1990) pp.139-144
- [46] 杉本：位置と力のハイブリッド制御に関する理論的考察, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3 (1993) pp.453-460
- [47] 平林ほか：多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.3 (1986) pp.343-348
- [48] J. K. Salisbury : Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, Proc. 19th IEEE Conf. Decision control (1980) p.284
- [49] M. Peshkin : Programmed compliance for error corrective assembly, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No.4 (1990) pp.473-482
- [50] Matsuo, Iwaki : Compliance Design Method using Linear Programming, Proc. of 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Vol.2 (1992) pp.1238-1244
- [51] 久良, 田中：インダストリアルロボットにおけるセンサ利用の現状, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3 (1991) pp.82-88
- [52] Hong Zhang : Kinematic Stability of Robot Manipulators under Force Control, IEEE International Conference on Robotics and Automation (1989) pp.80-88
- [53] T. Yabuta : Stability Feature of the Hybrid Position/Force Control Scheme for Robot Manipulator, IROS 88 (1988) pp.367-372
- [54] R. P. Paul : Problems and Research Issues Associated with the Hybrid Control of Force and Displacement, Proc. 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation (1987) pp.1966-1971
- [55] G. Liu et al : Robust Hybrid Impedance Control of Robot Manipulators, IEEE RA (1991) pp.287-292
- [56] Y. H. Chen and S. Pandey : Uncertainty bounded hybrid control for impact control for robot manipulators, IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol.6, No.3 (1990) pp.303-311
- [57] K. Takase : Task-Oriented Variable Control of Manipulator and Its Software Servoing System, Proc. IFAC (1977) pp.139-145
- [58] 金子ほか：シリアルリンクアームのダイレクトコンプライアンス制御, 日本機械学会論文集 (C), Vol.54, No.503 (1988)
- [59] 岩城：安定な負のコンプライアンスを用いたマニピュレータのコンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.6 (1990) pp.698-705
- [60] 松本潔, 畑村洋太郎, 中尾政之：ネガティブコンプライアンス素子を用いた加工誤差の低減—平面研削装置への適用—, 精密工学会誌, Vol.65, No.7 (1999) pp.1041-1045
- [61] Y. Nakamura et al : Optimal Use of Nonlinear Electromagnetic Force for Macro Motion Wrist, IEEE RA (1991) pp.1040-1045
- [62] R. P. Paul and B. Shimano : Compliance and Control, Proc. of the Joint Automatic Control Conference (1976) pp.694-699
- [63] D. E. Whitney and J. M. Rourke : Mechanical behaviour and design equations for elastomer shear pad remote center compliance, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.108 (1986) pp.223-232
- [64] M. Brady et al. (eds.) : Robot Motion Planning and Control, MIT Press, Cambridge, MA (1982)
- [65] D. E. Whitney : Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.104 (1982) pp.65-77
- [66] J. Luh, M. Walker and R. Paul : Resolved-acceleration control of mechanical manipulators, IEEE Trans. Autom. Control., Vol.AC-25, No.3 (1980) pp.468-474
- [67] <http://www.fanuc.co.jp/>
- [68] 平井：柔軟物操作, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2 (1998) pp.136-139

2.5 并联机构

- [1] 舟橋：ロボット機構としてのパラレルメカニズム，日本ロボット学会誌，Vol.10，No.6 (1992) pp.699-704
- [2] JIS B 0134：1998 (産業用マニピュレーティングロボット—用語) (2225) パラレルロボット (parallel robot)
- [3] D. Stewart：A platform with six degrees of freedom, Proc. the Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, Part I, No.15 (1965-66) pp.371-386
- [4] 新井：静力学特性に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と総合，日本ロボット学会誌，Vol.10，No.4 (1992) pp.526-533
- [5] J. P. Merlet：Direct Kinematics and assembly modes of parallel manipulator, Int. J. Robotics Research, Vol.11, No.2 (1992) pp.150-162
- [6] J. P. Merlet：Singular configurations of parallel manipulators and grassmann geometry, Int. J. Robotics Research, Vol.8, No.5 (1989) pp.45-56
- [7] 杉本浩一：パラレルメカニズムの運動学と動力学，精密工学会誌，Vol.63，No.12 (1997) pp.1646-1650
- [8] 中村：パラレルメカニズムの動力学，日本ロボット学会誌，Vol.10，No.6 (1992) pp.709-714
- [9] カヤバ工業ホームページ，<http://www.kyb.co.jp/6culture/61culture.gijitaiken.html>
- [10] 東北大学内山研究室ホームページ，<http://www.space.mech.tohoku.ac.jp/research/hexa/hexa.jpg>

2.6 柔性臂

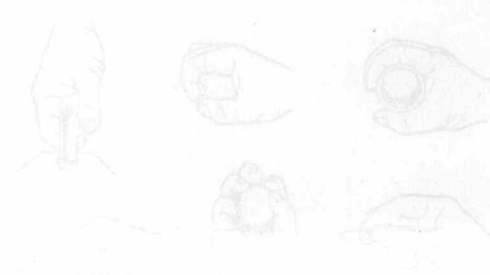
- [1] W. J. Book et. al.：Feedback control of two beam, two joint system with distributed flexibility, Trans. ASME, DSC, Vol.97, No.4 (1975) pp.424-431
- [2] W. J. Book：Recursive Lagrangian dynamics of flexible manipulator arms, Int'l J. Rob. Res., Vol.3, No.3 (1984) pp.87-101
- [3] R. H. Cannon and E. Schmitz：Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot, Int'l J. Rob. Res., Vol.3, No.3 (1984) pp.62-75
- [4] 福田：フレキシブルロボットアームの制御 (第1報，一，二自由度系の位置決め時の振動制御)，日本機械学会論文集，Vol.51，No.468 (1985) pp.2140-2144
- [5] 福田，荒川：フレキシブルロボットアームの制御 (第2報，2自由度連成系のモデルと基本特性)，日本機械学会論文集，Vol.53，No.488 (1987) pp.954-961
- [6] 福田ほか：太陽電池パドルのフレキシビリティ制御 (第4報)，日本機械学会論文集，Vol.53，No.487 (1987) pp.744-749
- [7] 福田ほか：柔軟構造物のフレキシビリティ制御 (第1報，曲げ，ねじり連成振動のモデル化と制御方法)，日本機械学会論文集，Vol.54，No.499 (1988) pp.630-637
- [8] T. Fukuda：Flexibility control of elastic robotic arms, J. of Robotic Systems, Vol.2, No.1 (1985) pp.73-88
- [9] T. Fukuda：Applications of Elastic Robotic Arms in Material Handling, Robotics and Material Flow, Elsevier (1986) pp.17-26
- [10] 坂和，松野：フレキシブルアームのモデリングと制御，計測と制御，Vol.25，No.7 (1986) pp.64-70
- [11] 吉田ほか：弾性構造系のデジタル最適制御 (弾性回転アームの位置決め制御)，日本機械学会論文集，Vol.52，No.484 (1986) pp.3073-3080
- [12] 姜ほか：nリンク弾性ロボットアームのダイナミクスの解析，第4回日本ロボット学会学術講演会 (1986) pp.423-426
- [13] 小松ほか：ポテンシャル改善に基づく柔軟アームの振動制御，第4回日本ロボット学会学術講演会 (1986) pp.403-404
- [14] 辻尾ほか：柔軟マニピュレータの動力学モデル，日本機械学会講演論文集，No.870-3 (1987) pp.19-24
- [15] H. Asada et. al.：Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms for Trajectories Control, ASME Winter Annual Meeting (1987) pp.329-336
- [16] E. Bayo：A finite-element approach to control the end-point motion of a single-link flexible robot, J. of Robotic Systems, Vol.4, No.1 (1987) pp.63-75
- [17] T. J. Tarn et. al.：On the Modelling of Flexible Robot Arms (Devised), Robotics Laboratory Report, SSM-RL-88-11 (1988) pp.1-63
- [18] B. Gebler：Feed-Forward Control Strategy for an Industrial Robot with Elastic Links and Joints, Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, Vol.2 (1987) pp.923-928
- [19] 馬ほか：フレキシブルロボットアームの逆動力学—第1報，平面運動の場合，第4回日本ロボット学会学術講演会 (1986)
- [20] 辻尾：柔軟なマニピュレータの逆動力学問題に対する一接近法，第5回日本ロボット学会学術講演会 (1987) pp.331-334
- [21] 沈ほか：CCDを用いた1リンクフレキシブルアームの適応制御，第5回日本ロボット学会学術講演会 (1987) pp.313-314
- [22] 日本ロボット学会誌，フレキシブルアーム特集号，Vol.6，No.5 (1988)
- [23] 日本ロボット学会誌，「特集」フレキシブルマニピュレータ，Vol.12，No.2 (1994)
- [24] 計測自動制御学会編：ロボット制御の実際，コロナ社 (1997) pp.194-200
- [25] 大須賀，松野：マニピュレータにおける受動性のロバスト性について，日本ロボット学会誌，Vol.19，No.1 (2001) pp.75-80
- [26] W. J. Book, O. Maizza-Neto and D. E. Whitney：Feedback control of two beam, two joint systems with distributed flexibility, ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.97, No.4 (1975) pp.424-431
- [27] R. H. Cannon, Jr. and E. Schmitz：Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot, Int. J. Robotics Research, Vol.3, No.3 (1984) pp.62-75
- [28] Y. Sakawa, F. Matsuno and S. Fukushima：Modeling and feedback control of a flexible arm, J. Robotic Systems, Vol.2, No.4 (1985) pp.35-54
- [29] 金子真編：フレキシブルアーム特集号，日本ロボット学会，Vol.6，No.5 (1988) pp.415-467

- [30] 松野文俊編：フレキシブル・マニピュレータ特集号，日本ロボット学会，Vol.2，No.2 (1994) pp.169-230
- [31] 狼嘉彰，木田隆，山口功：LSSのダイナミクス，モデリングおよび低次元化，計測と制御，Vol.26，No.10 (1987) pp.845-854
- [32] 松野文俊，池田雅夫：宇宙構造物のための制御理論—集中定数アプローチ，システム/制御/情報，Vol.39，No.3 (1995) pp.124-129
- [33] 木田隆，池田雅夫，山口功：高域遮断特性をもたせた最適レギュレータとその大型宇宙構造物の制御への応用，計測自動制御学会編文集，Vol.25，No.4 (1989) pp.448-454
- [34] H. Kimura, T. Oike, A. Miura, K. Akai and T. Kida: Robust stability-degree assignment and its application to the control of flexible structures, Int. J. Robust and Nonlinear Control, Vol.1 (1991) pp.153-169
- [35] 前田肇，杉江俊治，アドバンスド制御のためのシステム制御理論，朝倉書店 (1990)
- [36] 松野文俊：柔軟構造物の制御，計測と制御，Vol.35，No.12 (1996) pp.953-954
- [37] B. Siciliano and W. J. Book: A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators, Int. J. Robot. Res., Vol.7, No.4 (1988) pp.79-90
- [38] N. C. Singer and W. P. Seering: Preshaping command inputs to reduce system vibration, ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.108 (1990) pp.76-82
- [39] D. Henry: Geometric Theory of Semilinear Parabolic Equations, Lecture Notes in Mathematics, Springer-Verlag (1981)
- [40] 松野文俊，村田和隆：先端負荷をもった2リンク柔軟アームのPDS制御，システム制御情報学会論文誌，Vol.14，No.1 (2001) pp.26-32
- [41] F. Matsuno and S. Kasai: Modeling and robust force control of constrained one-link flexible arms, J. Robotic Systems, Vol.15, No.8 (1998) pp.447-464
- [42] C. Chiou and M. Shahinpoor: Dynamic stability analysis of a two-link force-controlled flexible manipulator, ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control, Vol.112 (1990) pp.661-666
- [43] J. K. Mills: Stability and control aspects of flexible link robot manipulators during constrained motion tasks, J. Robotic Syst., Vol.9, No.7 (1993) pp.935-953
- [44] 松野文俊，林彰史：双腕1自由度フレキシブルアームのPDS協調制御，計測自動制御学会論文集，Vol.38，No.5 (2002) pp.447-455
- [45] 松野文俊：柔軟メカニカルシステムのダイナミクスベースト制御—複雑なシステムの物理的本質をついた制御—，計測と制御，Vol.40，No.6 (2000) pp.417-425
- 2.7 控制理论的应用
- [1] I. D. Landau, 富塚：適応制御システムの理論と実際，オーム社 (1981)
- [2] 小特集 適応制御，計測自動制御学会，計測と制御，Vol.23，No.5 (1984)
- [3] 市川，金井，鈴木，田村：適応制御，昭晃堂 (1984)
- [4] S. Dubowsky and D. T. Desforges: The application of model reference adaptive control to robotic manipulators, Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.101, No.9 (1979) pp.193-200
- [5] 竹垣，有本：マニピュレータの適応的な軌道制御方式，計測自動制御学会論文集，Vol.17，No.4 (1981) pp.467-472
- [6] H. Mayeda, K. Osuka and A. Kangawa: A New Identification Method for Serial Manipulator Arms, Proc. IFAC 9th World Congress, Vol.2 (1984) pp.74-79
- [7] 川崎：オンラインパラメータ同定によるマニピュレータの軌道制御，計測自動制御学会論文集，Vol.20，No.9 (1984) pp.780-789
- [8] S. Arimoto and F. Miyazaki: Stability and Robustness of PID Feedback for Robot Manipulators of Sensory Capability, In Robotics Research, First Int. Symposium, MIT Press (1983) pp.783-799
- [9] S. Arimoto: Control Theory of Non-Linear Mechanical Systems—A Passivity-Based and Circuit—Theoretic Approach, Oxford Science Publication (1996)
- [10] 大須賀，松野：マニピュレータにおける受動性のロバスト性について，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.9 (2001) pp.75-80
- [11] 大須賀：非線形メカニカルシステムの適応制御，計測自動制御学会論文集，Vol.22，No.7 (1986) pp.756-762
- [12] J. J. Craig, P. Hsu and S. Sastry: Adaptive Control of Mechanical Manipulators, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation (1986) pp.190-195
- [13] J. J. E. Slotine and W. Li: On the adaptive control of robot manipulators, Int. J. of Robotics Research, Vol.6, No.3 (1987) pp.49-59
- [14] 井村，杉江，吉川：ロボットマニピュレータの適応ロバスト制御，計測自動制御学会論文集，Vol.27，No.3 (1991) pp.314-319
- [15] 渡辺，内田：ゲインスケジューリングとしての適応同定，計測と制御，Vol.40，No.10 (2001) pp.729-734
- [16] 特集 適応・学習制御システムの新展開，計測と制御，Vol.40，No.10 (2001)
- [17] 泉田，長岡，室津：宇宙ロボットの適応制御，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.6 (1998) pp.832-838
- [18] 大須賀，佐藤，小野：脚ロボットEmuに対する非線形適応制御則について—実験による有効性の確認—，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.2 (1997) pp.306-311
- [19] C. Chew and G. A. Pratt: A Minimum Model Adaptive Approach for a Planar Biped, Proc. Of the 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems (IROS) (1999) pp.1469-1474
- [20] 鈴木，成清，H. D. Tuan，原：未知ダイナミクスを含む非ホロノミック力学系の軌道追従制御，計測自

- 動制御学会論文集, Vol.37, No.8 (2001) pp.763-769
- [21] R. Bellman : Dynamic Programming, Princeton U. P. (1957)
- [22] L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze and E. F. Mishchenko : The Mathematical Theory of Optimal Processes, John Wiley & Sons, Inc. (1962)
- [23] 嘉納秀明 : システムの最適理論と最適化, コロナ社 (1986)
- [24] D. J. Bell and D. H. Jacobson : Singular Optimal Control Problems, Academic Press (1975)
- [25] M. Bardi and I. Capuzzo-Dolcetta : Optimal Control and Viscosity Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations, Birkhäuser (1997)
- [26] 嘉納秀明 : 最適制御問題—変分法と H^∞ 制御および粘性解—, 計測と制御, Vol.36, No.11 (1997) pp. 768-775
- [27] J. Wen and A. Desrochers : Existence of the time optimal control for robotic manipulators, Proceedings of A. C. C., Vol.1 (1986) pp.109-113
- [28] M. E. Kahn and B. Roth : The Near-Minimum Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains, Trans. ASME (J. of D. S. M. C.), (1971) pp.164-172
- [29] E. D. Sontag and H. J. Sussmann : Time-optimal control of manipulators, Proceedings of IEEE International Conference on Robot Automation, Vol.3 (1986) pp.1692-1697
- [30] J. E. Bobrow, S. Dubowsky and J. S. Gibson : On the Optimal Control of Robotic Manipulators with Actual Constraints, Proc. of the A. C. C. (1983) pp.782-787
- [31] K. G. Shin and N. D. McKay : Minimum-time control of robotic manipulators with geometric path constraints, IEEE Trans., Vol.AC-30, No.6 (1985) pp.531-541
- [32] Z. Shiller : On singular time-optimal control along specified paths, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.10, No.4 (1994) pp.561-566
- [33] M. Vukobratovic and M. Kircanski : A dynamic approach to nominal trajectory synthesis for redundant manipulators and IEEE Trans., Vol. SMC-14, No.4 (1984) pp.580-586
- [34] 中村, 花房 : 関節形ロボットアームの最適冗長性制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.5 (1985) pp.501-507
- [35] M. Galicki : Time-optimal controls of kinematically redundant manipulators with geometric constraints, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.16, No.1 (2000) pp.89-93
- [36] 今福, 山下, 西谷 : Hamilton-Jacobi 偏微分方程式の粘性解を用いた三輪移動体の制御, 日本ロボット学会誌 Vol.17, No.5 (1999) pp.689-695
- [37] D. B. Reister and F. G. Pin : Time-optimal trajectories for mobile robots with two independently driven wheels, The International J. of Robotics Research, Vol.13, No.1 (1994) pp.38-54
- [38] 井前, 平山, 古館 : 非ホロノミックシステムの軌道計画問題 (最適制御アルゴリズムからの接近), 日本機械学会論文集 (C), Vol.62, No.600 (1996) pp. 3168-3174
- [39] R. Fotouhi-C. and W. Szyszkowski : An algorithm for time-optimal control problems, Trans. of the ASME, Vol.120 (1998) pp.414-418
- [40] Y. Chen and J. Huang : An improved computation of time-optimal control trajectory robotic point-to-point motion, Int. J. Control, Vol.65, No. 1 (1996) pp.177-194
- [41] Y. H. Kim, F. L. Lewis and D. M. Dawson : Intelligent optimal control of robotic manipulators using neural networks, Automatica, Vol.36 (2000) pp.1355-1364
- [42] H. Seywald, R. R. Kumar and S. M. Deshpande : Genetic algorithm approach for optimal control problems with linearly appearing controls, J. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.18, No.1 (1995) pp.177-182
- [43] 内山勝 : 試行による人工の手の高速パターン形成, 計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.6 (1977) pp.94-100
- [44] 美多勉, 加藤英治, 青木康史 : 反復制御とロボットアームの軌道制御への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11 (1985) pp.87-94
- [45] 古田勝久, 山北昌毅 : 線形多変数システムに対する学習制御系設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.12 (1986) pp.6-13
- [46] 杉江俊治, 小野敏郎 : 学習制御に関する一考察, システムと制御, Vol.31, No.2 (1987) pp.43-49
- [47] 浜本研一, 杉江俊治 : 学習入力空間の有限次元化を用いたロボットアームの反復学習制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.4 (2001) pp.325-330
- [48] 武田宗久, 増田隆広, 二川暁美, 川村貞夫, 宮崎文夫, 有本卓 : 線形近似逆システムに基づいたロボットの学習制御法, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No. 2 (1987) pp.55-65
- [49] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyazaki : Bettering operation of robots by learning, Journal of Robotic Systems, Vol.1, No.2 (1984) pp.123-140
- [50] 川村貞夫, 宮崎文夫, 有本卓 : 動的システムの学習的制御法 (Betterment Process の提案), 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.1 (1986) pp.56-62
- [51] S. Kawamura, F. Miyazaki and S. Arimoto : Iterative Learning Control for Robotic Systems, Proc. of IECON '84, Tokyo (1984) pp.393-398
- [52] 有本卓, 玉城史朗, 川村貞夫, 宮崎文夫 : 線形時変メカニカルシステムに対する学習制御系の収束性, システムと制御, Vol.30, No.4 (1986) pp.51-58
- [53] S. Kawamura, F. Miyazaki and S. Arimoto : Realization of Robot Motion Based on a Learning Method, 1988 IEEE Trans. on SMC, Vol.18, No.1 (1988) pp.126-134
- [54] S. Arimoto : Control Theory of Non-linear Mechanical System : Passivity-based and Circuit-theoretic Approach, Clarendon Press, Oxford (1996)
- [55] 有本卓 : ロボットの力学と制御, 朝倉書店 (2002)
- [56] J. E. Hauser : Learning Control for a Class of

- Nonlinear Systems, Proc. of the 26th IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, CA, December (1987) pp.859-860
- [57] S. Arimoto, S. Kawamura and F. Miyaza : Convergence, Stability, and Robustness of Learning Control Schemes for Robot Manipulators, Recent Trends in Robotics : Modeling, Control and Education, Elsevier, New York (1987) pp.307-323
- [58] Z. Bien and J. X. Xu : Iterative Learning Control : Analysis, Design, Integration and Applications, Kluwer Academic Publishers (1998)
- [59] 加藤尚武 : バッチプロセスの学習制御, システム制御情報, Vol.35, No.3 (1991) pp.138-144
- [60] Shunmugham R. Pandian and S. Kawamura : Hybrid force/position control for robot manipulators based on a D-type learning Law, International Journal of Robotica, Vol.14 (1996) pp.51-59
- [61] 深尾典久, 川村貞夫 : 学習制御で得られたロボットの入力トルクパターンの非線形時間軸変換, 計測自動制御学会論文, Vol.32, No.7 (1996) pp.1107-1112
- [62] 深尾典久, 川村貞夫 : 学習制御で得られた入力を用いるロボットの実用的な最短時間制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2 (1998) pp.107-114
- [63] K. Furuta, K. Kosuge, O. Yamano and K. Nosa-ki : A Control Method of Manipulator with Non-linearity, Proc. of ICAR (1983) pp.229-236
- [64] K. Furuta, K. Kosuge, O. Yamano and K. Nosa-ki : Robust control of a robot manipulator with non-linearity, Robotica, Vol.2 (1985) pp.75-81
- [65] K. Furuta, K. Kosuge and M. Yamakita : Trajectory tracking control of robot arms using ORBIX, Journal of Robotic Systems, Vol.2, No.1 (1985) pp.89-112
- [66] M. W. Spong and M. Vidyasagar : Robust Linear Compensator Design for Nonlinear Robotic Control, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (1985) pp.954-959
- [67] T. Sugie, T. Yoshikawa and T. Ono : Robust controller design for robot manipulators, Trans. ASME, Journal of Dynamics Systems Measurement and Control, Vol.110, No.3 (1988)
- [68] V. Utkin : Variable structure systems with sliding mode, IEEE Trans. on AC, Vol.AC-22, No. 2 (1977) pp.212-222
- [69] V. Utkin : Equations of Sliding Mode in Discontinuous Systems I, Automation and Remote Control, (1971) pp.1897-1907
- [70] V. Utkin : Equations of Sliding Mode in Discontinuous Systems II, Automation and Remote Control, (1972) pp.211-219
- [71] K. K. D. Young : Controller design for a manipulator using theory of variable structure system, IEEE Trans. on SMC, Vol.SMC-8, No.2 (1978) pp.101-109
- [72] J. J. Slotine and S. S. Sastry : The robust control of robot manipulators, International Journal of Robotic Research, Vol.4, No.2 (1985) pp.49-64
- [73] F. Harashima, H. Hashimoto and K. Maruyama : Sliding mode control of manipulator with time-varying switching surfaces, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.3 (1986) pp.335-342
- [74] K. Kosuge and K. Furuta : Motion Control of a Robot Arm Using Variable Structure Systems, Proc. of USA-JAPAN Symposium on Flexible and Automation, Vol.1 (1988) pp.167-174
- [75] K. S. Yeung and Y. P. Chen : A new controller design for manipulators using the theory of variable structure systems, IEEE Trans. on AC, Vol. AC-33, No.2 (1988) pp.200-206
- [76] 原島文雄, 橋本秀紀 : Sliding Mode とその応用-II, システムと制御, Vol.29, No.4 (1985) pp.242-250
- [77] 美多勉 : 非線形制御入門-劣駆動ロボットの技能制御論-, 昭晃堂 (2000)
- [78] G. Oriolo and Y. Nakamura : Free-Joint Manipulators : Motion Control under Second-order Non-holonomic Constraints, Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991) pp.1248-1253
- [79] 中村仁彦, 岩本隆史, 吉本堅一 : ドリフト項をもつ非ホロノミック機械の制御, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6 (1995) pp.830-837
- [80] 小林啓吾, 井村順一, 吉川恒夫 : 二つの非駆動関節を持つ平面4自由度マニピュレータの可制御性, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6 (1999) pp.811-817
- [81] 吉川恒夫, 小林啓吾, 渡辺哲陽 : 非ホロノミック拘束を持つ3自由度マニピュレータの目標軌道の生成と収束制御, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No. 4 (2000) pp.584-589
- [82] 荒井裕彦 : 非駆動関節を有する3自由度マニピュレータの非ホロノミック拘束下における可制御性, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5 (1996) pp.751-758
- [83] 荒井裕彦, 谷江和雄, 城間直司 : 非駆動関節を有する水平3軸マニピュレータの非ホロノミック拘束下におけるフィードバック制御, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.6 (1997) pp.943-952
- [84] 南澤権, 美多勉 : 高次ノンホロノミック制御系の可変周期有限制定制御と劣駆動機械制御への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.11 (2000) pp. 952-961
- [85] 三平満司 : 厳密な線形化とそのけん引車両の軌道制御への応用, 計測と制御, Vol.31, No.8 (1992) pp.851-858
- ## 2.8 手臂机构的设计和评价
- [1] 高野政晴 : ロボット機構系の設計, 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.4 (1986) pp.394-400
- [2] 大道武生, 樋口優, 大西献 : 極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究 (その1) - 繊細感覚多本指マニピュレータの設計法 -, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.4 (1998) pp.515-516
- [3] 昭和62年度実用原子力発電施設作業ロボット開発委託研究成果報告書, 極限作業ロボット研究組合 (1987) pp.668-670
- [4] 大道武生, 井辺智吉, 川内直人, 浜名通夫, 磯崎芳史 : オープンシステムアーキテクチャに基づく知能

- ロボット化のためのハードウェア設計法, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2 (1996) pp.228-229
- [5] MATLAB ホームページ, <http://www.cybernet.co.jp/product/matlab>
- [6] User for Mathematics, <http://www.hatatabi.sccs.chukyo-u.ac.jp/~t8198003/mathz.htm/>
- [7] T. Oomichi, S. Shiotani and R. Miyauchi: The Design of a Serial Communication Link for Built-in Servo Driver and Sensors in a Robot, Proc. of the 8th International Symposium of Robotics Research, Springer (1998) pp.185-194
- [8] 内山勝, 清水邦敏, 箱守京次郎: ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価, 計測自動制御学会論文誌, Vol.21, No.2 (1985) pp.190-196
- [9] 吉川恒夫: ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.1 (1984) pp.69-87
- [10] 浅田春比古: ロボットアーム動特性の幾何学的解析法, 計測自動制御学会論文誌, Vol.19, No.6 (1983) pp.500-505
- [11] 吉川恒夫: ロボットアームの動的可操作度, 計測自動制御学会論文誌, Vol.21, No.9 (1985) pp.970-975
- [12] J. K. Seliabuty and J. J. Craig: Articulated hands: Force control and kinematics issues, Intr. J. Robotics Research, Vol.1, No.1 (1982) pp.6-17
- [13] C. A. Klein: Use of Redundancy in the Design of Robotics Systems, Robotics Research. The Second International Symposium (eds. H. Hanafusa and H. Inoue), MIT Press (1985) pp.207-214
- [14] L. K. Baker: Vector-Algebra Approach to Ex-2191
- [15] H. Zhen: Error Analysis of Robot Manipulators and Error Transmission Functions, Proc. 15th ISIR (1995) pp.873-878
- [16] D. Payannet et al.: Identification and Compensation of Mechanical Error for Industrial Robot, Proc. 15th ISIR, Vol.2 (1985) pp.873-878
- [17] D. E. Whitney et al.: Industrial Robot, Calibration Method and Realize, ASME Proc. '84 ICECE, Vol. 1 (1984) pp.92-100
- [18] S. A. Hayati: Robot Geometric Link Parameter Estimation, IEEE Control System Society, Decision and Control, 22nd Conference, Vol.3 (1983) pp.1477-1483
- [19] B. W. Mooring: The Effective of Joint Axis Misalignment on Robot Positioning Accuracy, Proc. ASME Computers in Engineering Conference, Vol.2 (1983) pp.151-155
- [20] B. W. Mooring and G. R. Tang: An Improved Method for Identifying the Kinematics Parameters in a Six Axis Robot, ASME Proc. '84 ICECE, Vol.1 (1984) pp.79-84
- [21] 岡田拓史, 毛利峻治: 多関節ロボット機構誤差補正方法, 日本機械学会論文集 (C), Vol.51, No.462 (1985) pp.324-331
- [22] T.-W. Hsu and L. J. Everett: Identification of the kinematic parameters of positional accuracy improvement, Comput. Eng., Vol.1 (1985) pp.263-267
- [23] Chi-Haur Wu: A kinematics CAD tool for the design and control of a robot manipulator, Robotics Research, Vol.3, No.1 (1984) pp.58-67
- [24] 日本ロボット学会: ロボット操作性, 誤差の評価, ロボット工学ハンドブック (旧版), コロナ社 (1990) pp.284-288



第3章 手部机构和控制

3.1 手部的分类

安装在机器人手臂末端、直接作用于对象的装置叫做末端执行器(end effector)。人体的手与末端执行器的作用十分相似,所以人们更多地使用手部(hand)这个术语来代替末端执行器。人的手有5根手指,它由许多关节组成,能巧妙地完成许多复杂的作业。人们用手完成的作业是各种各样的,从制作物品、使用工具到对他人做手势等。在这些功能中,机器人技术更关心的是手的作业功能,而不在于它的信息传递功能。

人们早就对手的作业功能进行了分析研究。根据这些研究的结果,手的功能大致可以分为“抓取”和“操作”两类,按照 Schlesinger 的论文^[1],可以进一步把“抓取”分为如图 3.1 所示的 6 种形态。由图 3.1 可知,抓取中有的仅仅使用指尖部分轻盈地抓取,也有使用手掌实现有力的抓取等。如果能够将机器人手部设计得像人类的手那样具有普遍适用性,那当然是最理想的,但是事实上在机械和控制方面存在诸多困难,而且在实用中要求机器人完成的作业任务往往随着生产现场的具体情况而各不相同,实在没有必要以高昂的代价换取一个普遍适用的万能的手部。

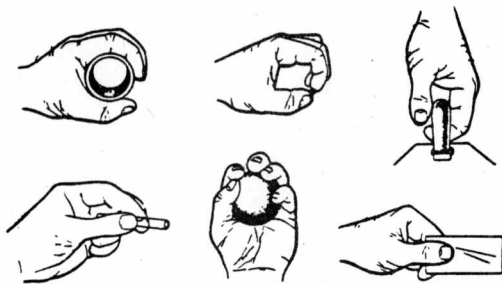


图 3.1 抓取的形态

生产线上应用的工业机器人的手部,一般采用钳子似的开闭机构来抓取物体。在这种手部机构中,手指(finger)是基本组成部

分,它们通过彼此相对运动就可以抓取物体。当抓取的对象被给定时,可以使用无关节的刚性手指,如能包罗物体外形的凹槽或 V 形槽。这种抓取特定形状物体的、具有特制的刚性手指的手部,叫做机械手部(mechanical hand)或机械手爪(mechanical gripper)。多数机械手部只有 2 根手指,有时也使用像三爪卡盘那样的三指结构。有些手部甚至利用手指开闭的动作通过杆件机构联动,使手指的形状随之发生一定变化。不过这种手部,即使手指形状能够发生变化,也不能像人的手指那样主动地实施控制,所以仍然应该归并于机械手部这一大类。

虽然针对特定对象机械手部能满足规定作业的要求,但它能适应的作业种类有限。在希望机器人完成的作业中,有一些作业要求操作大型物体或柔软物体,用无关节的刚性手指的机械手部显然无法操作这种对象。在这种情况下,不一定要在手臂末端安装带手指的机械手部,可以代之以适合作业的特殊装置。例如,搬运大型金属平板或玻璃板的机器人,可以采用小型磁力吸盘或真空吸盘。进行焊接或喷涂作业用的机器人,则可以采用焊枪或喷涂用的喷枪。如果把手部的定义加以扩展,这种安装在手臂末端的、完成特定作业的装置就叫做特殊手部(special purpose hand)或专用末端执行器(special end effector)^[2]。

另一种手部与上述完成特定功能的手部完全不同,它有近似于人手的形状,具备通用的功能,这种手部叫做通用手部(universal hand)。通用手部一般具有 2~5 根手指,每根手指都相当柔软,由受外部动力而能产生运动的关节组成^[2]。开发通用手部需要解决两个方面的问题:一方面是在大小有限的手部形体内如何容纳数量很多的关节,即所谓机构设计的问题;另一方面是如何建立控制算法,以便充分有效地发挥多关节的复杂机

构的作用,再现人手手指所具有的灵巧技能,即所谓控制技术的问题。在机构设计方面,比较大的问题是驱动器的安装地点。如果打算将驱动器植入关节内部,那么在选择驱动器和设计机构的时候,需要通盘考虑关节尺寸与手部产生的最大指尖力的关系。反之,如果打算将驱动器与手部关节进行分离安装,那么在机构设计方面,对动力传递方式的高可靠性将提出严格的要求。

当然,还可以考虑机械手部和通用手部之间的一个折中设计方案。例如,有一类手部,手指的各个关节并非一一对应着驱动器,而是将关节之间的运动形成被动约束的关系,驱动器的数目就可以少于关节数目。还有一种手部,利用简单的机械离合关系依次约束关节之间的运动,按照对象的形状实现抓握,也可以将其归于这一类。本书将这样的一类手部归并到半通用手部(semi-universal hand)中。对于半通用手部,我们不期望它具有与人手相同的操作灵巧性,如果设计得巧妙的话,可以大幅度简化手部结构,不仅使整个系统更紧凑,而且使动作的可靠性也得到提高。

究竟选择机械手部、通用手部或是半通用手部,这与现场作业内容有密切的关系。

谷江和雄 金子 真

3.2 特殊末端执行器

在 JIS B 8443-2000 的“利用抓握型手爪进行对象操作的术语及特性表示方法”中对末端执行器的种类做了如下的分类:

1) 工具型末端执行器

伴随机器人手臂运动并定位的过程,其本身也是在同时完成实际作业任务的末端执行器。

例如,焊枪、焊钳、喷砂头、研磨头、去毛边工具、铣刀、钻头、喷枪、粘接剂枪、自动螺丝刀、激光切割枪、喷射枪等。

2) 手 爪

为抓握或保持而设计的末端执行器。

3) 末端执行器

机器人持有的直接作用于作业对象的功能的部分(例如,夹持器、螺母拧紧工具、焊枪、喷枪)(JIS B 0134)。

本节的特殊末端执行器是与上述的“工具型末端执行器”相对应的,而机械手部和通用手部是与“手爪”相对应的。

工业机器人作业时几乎都是通过特殊末端执行器或机械手部来实施的。如果用手工换装工业机器人的末端执行器,为了保证互换性和安装的可重复性,JIS B 8436 和 JIS B 8441 规定了机械接口的有关标准,而 JIS B 8442 规定了末端执行器自动交换装置的术语和特性的表示方法。根据这些标准可以发现,其实一台机械手适用于多种作业的情况并不多,尽管也可能出现个别例外。以焊接作业为例,弧焊机器人的特殊末端执行器就是弧焊枪,这种机器人的抓持质量一般为 3~10kg,而点焊机器人的末端执行器是点焊枪,抓持重量一般为 100~200kg,两者有很大的不同。另外,不同作业对机械手的动作、姿态、刚性等的要求也不同。

再有,末端执行器满足作业所需空间自由度的方法,除了通过机械手本身实现以外,如果机械手本身的关节数不足,那么还可以将机械手与自身内装关节的末端执行器组合起来实现。不过,此时应该将末端执行器与机械手视为同一个系统来处理。

图 3.2 给出特殊末端执行器的例子。

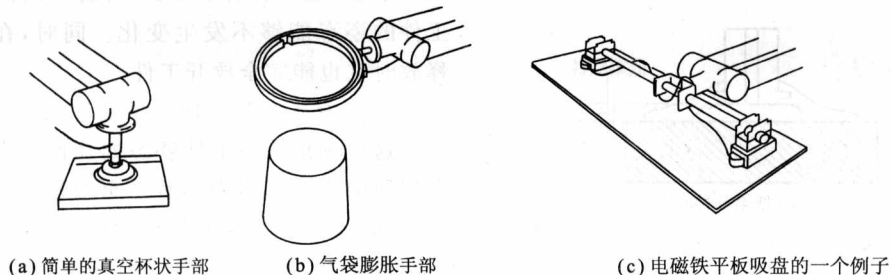


图 3.2 特殊末端执行器的例子

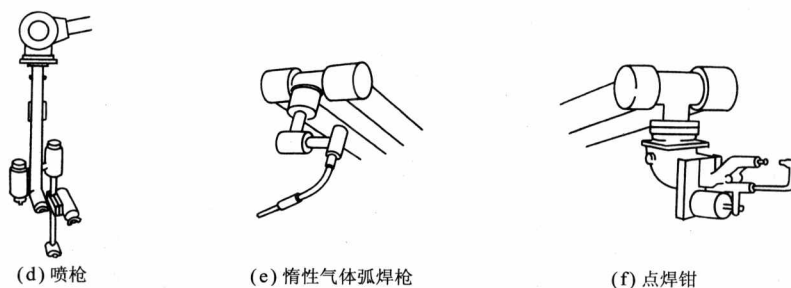


图 3.2 特殊末端执行器的例子(续)

人们将约束对象移动自由的、能起到人手功能的机构称为抓取机构。抓取对象的条件,如形状、尺寸、质量等各有不同,因此抓取机构也相应地有多种机构。可以按如图 3.3 所示对抓取进行分类,其中吸附、支撑(将叉子等插入工件的下方承载工件的方式)两种方式是借助于特殊末端执行器来实现的。

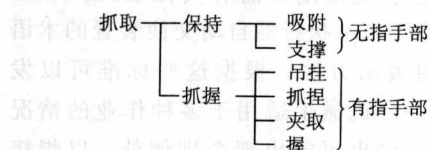


图 3.3 抓取的分类

吸附又可以分为真空吸盘手部、电磁吸盘手部两种。真空吸盘的构造十分简单,可根据用途选择各种形式,包括不同柔性(图 3.4),或可针对不同的工件形状和质量,通过多个吸盘的组合构成适合对象特性的特殊末端执行器^[3]。

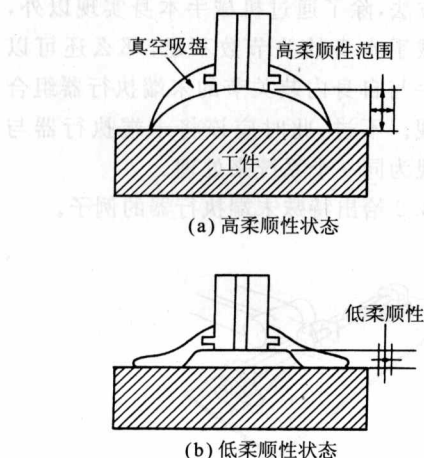


图 3.4 真空吸盘及柔性

因此,真空吸盘可以广泛用于各种对象

的搬运作业。电磁吸盘的原理限制了它所适用的作业工件,但是它的一个特点是不像真空吸盘那样需要附加真空源。电磁吸盘与吸附面之间的间隙对吸附性能有很大影响,因此要求工件的吸附表面要平坦。有时工件的接触部分可以改用磁性粉末材料^[4]。

市川 诚

3.3 机械手

1. 什么是机械手

在 1998 年尚未将 JIS B 0134 向 ISO 8373 对应修正之前,“工业机器人术语”中将机械手(mechanical hand)这一术语定义为“工业机器人中‘具有与人手类似功能的部分’”的手部相对应的机构。在修改后的 JIS B 0134-1998 中,查阅“工业用操作机器人术语”时,其实找不到与之相应的术语,仅仅能够找到分别与上一节介绍的末端执行器、夹持器(手爪)所对应的术语。其中,机械手(手爪)可以理解为具有 2~3 根手指、能抓取特定工件的手部。

2. 机械手的功能

机械手最低限度应该具有以下功能:

1) 工件抓握和释放功能

抓握工件时,具有一定的约束力或机械约束形态,这样在停留、移动、插入的过程中工件的姿态能够不发生变化。同时,在需要释放时它也能完全放开工件。

2) 抓握工件姿态的重复性

这里是指抓握工件姿态的几何偏差应该在规定的公差范围内具有可重复性。除此之外,有时还要求手部装备有检测工件油污、姿态的传感器,甚至要求它具有控制约束力的能力。

3. 按手指抓握运动轨迹的分类及其构造

按照用途的不同,机械手的手指关节有单关节和多关节两种。在许多工业机器人中,经常利用转动副或移动副将无关节的手指固定在机械手的指座上(它相当于手掌,但绝大多数不具备手掌的功能,所以在很多场合称其为指座),这种手指往往构成2组或4组,沿指座中心线对称布置。

下面按手指在抓握工件时的运动轨迹来对机械手进行分类,然后介绍它们的构造和特点。手指的驱动源有气压、液压、各种电机等方式,运动传递所用的零部件有连杆、凸轮、齿轮、钢丝绳、传动带、滑轮等,以及这些零部件的组合。在工业机器人中,多采用气压方式作为驱动源,使用连杆、凸轮、齿轮等零件或它们的组合体做运动传递。

1) 单指直线型

这种手部仅仅是一根无任何运动副的棒状手指,端部制作成类似弹簧筒夹的弹性体;或者在端部装上其他的弹性体,将手指插入工件的圆孔中;或者套在工件的外面即可实现抓取作业。图3.5是用它装配滚珠轴承的例子。手指的运动轨迹为一条直线。它适用于轴销或套筒等的压配合作业。

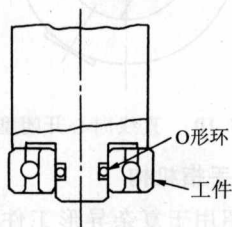


图 3.5 插装滚珠轴承用的单指手部

2) 圆弧开闭型

手指端部以转动副为轴心作圆弧运动。运动传递方式有两种,即如图3.6所示的凸轮式及图3.7(a)和(b)所示的连杆式。图3.6和图3.7(a)有两个相对的手指,同时完成工件抓握和定心动作。图3.7(b)中,手指的主要作用是防止工件脱落,装在指座上的导轨用来完成工件的定心作用,它的作用相当于手掌。

这种方式所能抓握的工件尺寸有一定的范围,超出预定的范围,工件就无法保持正常

的姿态。在规定尺寸范围内,凸轮式的结构比较简单,其在几何公差范围内的重复精度较好。

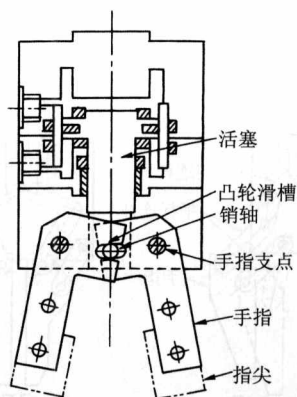


图 3.6 圆弧开闭型(凸轮式)^[1]

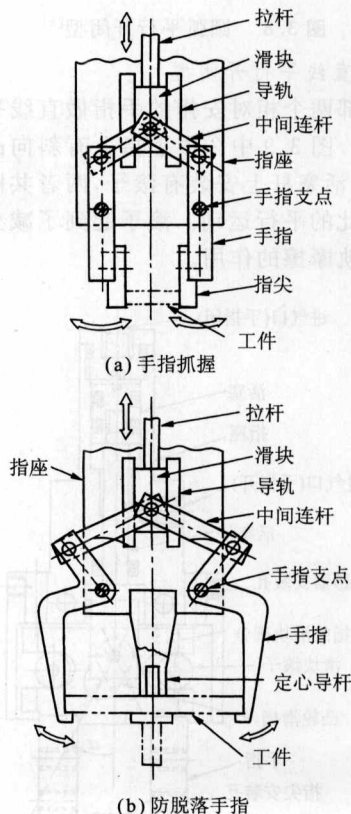


图 3.7 圆弧开闭型(连杆式)^[2]

3) 圆弧平行开闭型

如图3.8(a)、(b)所示,该手部利用传动副构成了平行连杆机构。从相对的手指来看,它完成的是平行开闭动作,而如果注意与工件的接触面,则手指上的各点是作圆弧运

动,所以手指与工件之间是边滑动,边接触,最后抓握。这一点对操作来说是既有利又有弊,至于到底选用图 3.8(a)、(b)中的哪一种形式,要根据对操作工艺的详细分析的结果来决定。

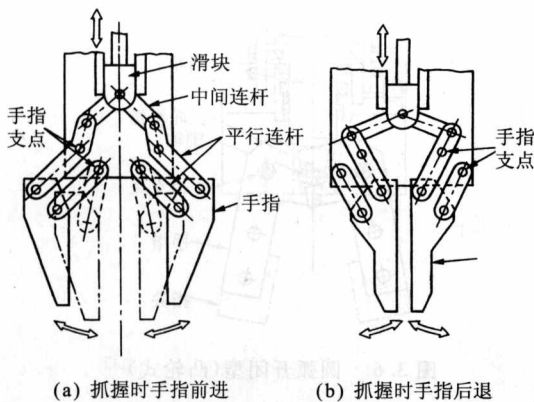


图 3.8 圆弧平行开闭型^[2]

4) 直线平行开闭型

手部两个相对安排的手指做直线平行开闭运动。图 3.9 中 2 根手指上有斜向凸轮导向滑槽,活塞杆上安装有滚子,两者共同完成手指彼此的平行运动。滚子起到了减少平行运动导轨摩擦的作用。

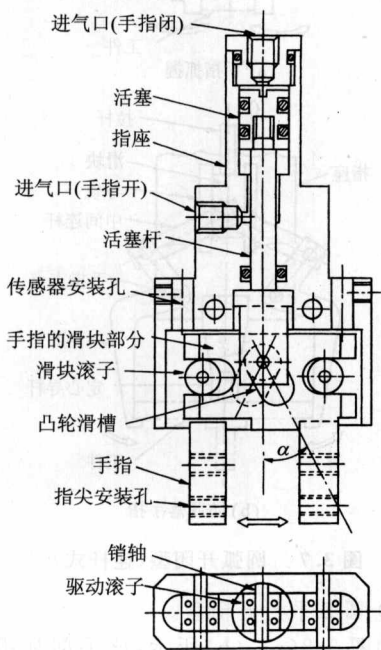


图 3.9 直线平行开闭型^[3]

5) 直线向心开闭型

3 根或 4 根手指呈放射状排列,各根手指在垂直于手部中心线的平面内做直线向心运动,完成开闭动作。图 3.10 给出一个类似三爪卡盘的例子。利用滚针分离器 1 和分离器 2 使滚针排列成手指直线运动的针状导轨。当大活塞下降时,以它下方的销轴为支点的活动杠杆让手指向闭合方向运动;当压缩空气切换至小活塞时,手指便被释放。

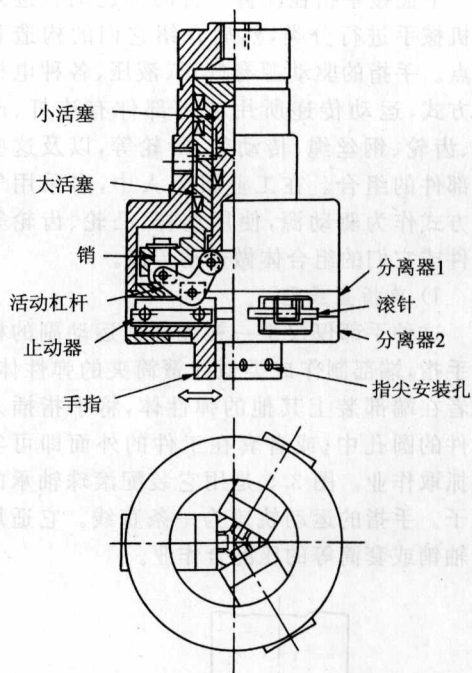


图 3.10 直线向心开闭型^[4]

4. 特殊手指机构

下面介绍用于复杂异形工件的特殊手指机构。

1) 柔软手爪(soft gripper)^[12]

图 3.11 是梅谷等开发的手爪。它由若干个关节组成,利用钢丝绳及滑轮完成开闭动作,能抓取具有异形轮廓的工件。

2) 气吸手爪(pneumatic gripper)^[13]

如图 3.12 所示,在橡胶袋中装入树脂等球状物(但未装满),然后将它紧压在工件上,抽去袋中的空气,于是橡胶袋就与其中容纳的球状物成为一个坚硬的整体,从而能抓握工件。

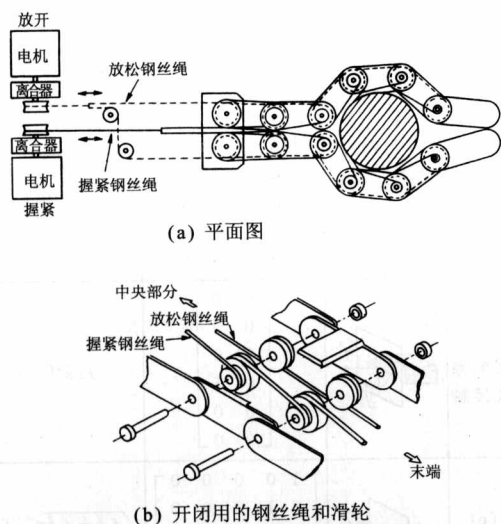
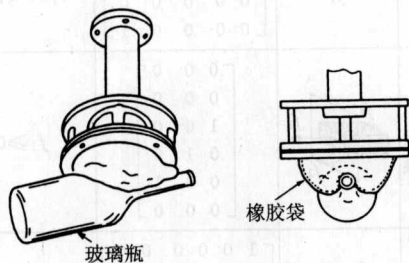
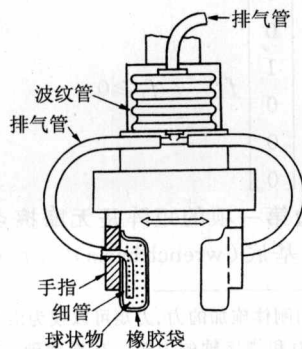
图 3.11 柔软手爪^[5]图 3.12 气吸手爪^[6]3) 膨胀手爪(inflatable gripper)^[13]

图 3.13 与上述气吸手爪属于同一类型, 装有树脂材料等球状物的橡胶袋被固定在直线平行开闭型上, 两个相对的手指借助于橡胶袋来抓握工件。

须藤宪道

图 3.13 膨胀手爪^[7]

3.4 手指与对象物接触的力学及运动学

3.4.1 接触形态的分类

在通过手部实施抓握这一类操作时, 分清指尖与对象物之间的接触模型是极其重要的。这是因为接触模型不同, 对象物所受的约束条件就会有很大的区别。两个物体接触时, 如表 3.1 所示, 可以划分为 9 种基本情况 (只有 6 种是独立的)^[1]。其中的稳定组合有以下几种:

表 3.1 两个物体接触时的组合情况

		物体 B		
		点	线	面
物体 A	点			
	线			
	面			

① 点接触(平面上的点与非平行线相交的直线)。

② 线接触(平面上的线)。

③ 面接触(平面上的平面)。

下面来介绍接触模型与运动自由度的关系。指尖运动的自由度可以按指尖有无摩擦来进行分类, 如表 3.2 所示。不过, 指尖模型中还经常用到一种软指尖模型^[1,2], 由于它具有一定程度的接触面积, 能产生绕对象物法线方向的力矩, 因此其指尖运动自由度为 2 个, 比有摩擦的点的接触情况要少。

表 3.2 指尖与对象物接触时的运动自由度

	无摩擦	有摩擦
点接触	5	3
线接触	4	1
面接触	3	0

手指向对象物施加力或力矩时,随着接触状态的不同,手指传递给对象物的力或力矩的各个分量也会发生相应的改变。同时,对象物与手指之间形成的运动约束的情况也会随着接触状态的变化而发生相应的改变。因此,在这样的情况下,可以从手指传递给对象物的力、力矩或运动的情况来定义约束。

首先,我们分析一下手指传递给对象物的力和力矩。为了简单起见,让接触坐标系 Σ_c 固定在对象物一侧的接触点上,设接触坐标系 Σ_c 的 z 轴与对象物内法线向量一致(图 3.14)。另外,对于三维空间内的接触,从接触坐标系来观察,将对象物所受到的接触力 ${}^c f_c \in R^3$ 和力矩 ${}^c m_c \in R^3$ 归并成一个向量表示,定义为 ${}^c t_c = [{}^c f_c^T \ {}^c m_c^T]^T$ 。这样就可以将对象物从手指处得到的接触力和力矩归纳成如表 3.3 所示的结果^[1,3]。

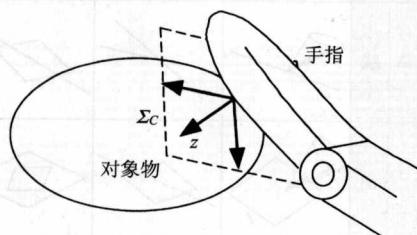


图 3.14 接触坐标系

以下专门列举表 3.3 中无摩擦点接触、有摩擦点接触、以及有摩擦面接触的三种情况来加以说明。

表 3.3 接触状态的种类

接触状态	接触图	力螺旋基底 H	摩擦限制 FC
(a) 无摩擦点接触		$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$f_1 \geq 0$
(b) 有摩擦点接触		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3$ $f_3 \geq 0$

续表 3.3

接触状态	接触图	力螺旋基底 H	摩擦限制 FC
(c) 软手指型接触		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3$ $f_3 \geq 0$ $ f_4 \leq \gamma f_3$
(d) 无摩擦线接触		$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$f_1 \geq 0$
(e) 有摩擦线接触		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3$ $f_3 \geq 0$ $ f_5 \leq \gamma f_3$
(f) 无摩擦面接触		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$f_1 \geq 0$
(g) 有摩擦面接触		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3$ $f_3 \geq 0$ $ f_6 \leq \gamma f_3$

(1) 无摩擦点接触 表 3.3(a) 所示的无摩擦点接触中,除了受到沿对象物接触面法线方向的接触力、力矩作用之外,不受其他力的作用。这时,下列关系成立:

$${}^c t_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_1 \quad f_1 \geq 0 \quad (3.1)$$

式中,右边第一项的矩阵是无摩擦点接触的力螺旋的基底(wrench basis)¹⁾, $f_1 \in R$ 表示

1) 向刚体施加的力、力矩可视为沿某一轴方向作用的平动力和绕该轴的力矩。在螺旋理论中,这样的力与力矩的组合称为力螺旋(wrench)。同样,刚体运动可以分解为沿某一轴方向的移动速度和绕该轴的旋转角速度。将速度与角速度的这种组合称为旋量(twist)^[3]。

沿法线方向施加的接触力的大小。手指力的特点是仅能向对象物施加推力,无法施加拉力。因此,可以假定 $f_1 \geq 0$ 。另外,虽然在实际的物理现象中不存在无摩擦点接触,但在某些情况下可以认为近似处于这种接触形态,例如,当摩擦力小到能够忽略的程度时,或者在用手部操作而不想利用摩擦力的场合。

(2) 有摩擦点接触 在表 3.3(b) 给出的有摩擦点接触模型中,在接触点处作用了静摩擦力,即在接触点处对象物受到来自手指的接触力中,除了沿接触面法线方向的力分量之外,切平面内还能承受有限的切向力分量。该关系式可用下式表示:

$$\sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3 \quad (3.2)$$

式中, f_1 及 f_2 分别为平行于接触面方向的接触力分量; f_3 为法线方向的接触力分量。由式(3.2)所表示的接触力的区域形成一个圆锥体,称为摩擦锥(friction cone)。这里, μ 为静摩擦系数,在接触点摩擦角 α 为已知的条件下,静摩擦系数可以利用下式进行定义:

$$\mu = \tan \alpha \quad (3.3)$$

由此,对象物所受的接触力、力矩可以表示为

$${}^c t_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} f, f \in FC \quad (3.4)$$

$$FC = \{f \in R^3 \mid \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3, f_3 \geq 0\} \quad (3.5)$$

与前述无摩擦点接触的情况相同,由于手部仅能向对象物施加推力,不能施加拉力,因此假定为 $f_3 \geq 0$ 。同样地,在该情况下,式(3.4)的右边第一项表示力螺旋基底。有摩擦点接触模型的特征是对象物基本上仅仅从手指受到接触力的作用,而不受到力矩。因此,从直观上我们很容易理解,这种接触方式可以应用于对抓握系统的分析。

后面我们会介绍,由于有摩擦面接触和有摩擦线接触也可以看成属于有摩擦点接触的一种集合情况,从这个意义上来说,有摩擦点接触是一种广泛适用的接触形态。

(3) 有摩擦面接触 在表 3.3(g) 所示的

有摩擦面接触中,虽然手指与对象物相互之间呈现面接触,不过我们要关注的是接触面内的代表点,考虑作用于该点的接触力、以及绕该点的接触力矩。另外,接触力、绕接触面的法线的力矩都受到一定的摩擦作用。

于是,在该接触状态下,加在对象物上的接触力、力矩为

$${}^c t_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} f, f \in FC \quad (3.6)$$

$$FC = \{f \in R^6 \mid \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \leq \mu f_3, \quad (3.7)$$

$$|f_6| \leq \gamma f_3, f_3 \geq 0\}$$

式中, γ 为扭转摩擦系数(coefficient of torsional friction)。

上面针对三种典型的接触形态,给出了向对象物施加的接触力、力矩的情况。无论在何种场合,在接触点处对象物受到的来自手指的接触力和力矩可以采用表示力螺旋基底的矩阵 H 来表示。

[在接触点处对象物所受到的来自手指的接触力和力矩]

$${}^c t_c = Hf, f \in FC \quad (3.8)$$

下面考虑手指和对象物的不同接触状态在对象物和手指之间所产生的运动约束。从固定在对象物一侧的接触点处的接触坐标系 Σ_c 来看,位于手指一侧接触点的相对速度为 ${}^c \dot{p}_{cf} \in R^3$,相对角速度为 ${}^c \omega_{cf} \in R^3$,将之组合起来可以定义成向量 ${}^c \dot{x}_{cf} = [{}^c \dot{p}_{cf}^T \quad {}^c \omega_{cf}^T]^T$ 。

首先考虑无摩擦点接触的情况。这时,仅仅接触点的法线方向上的相对速度为 0,其他的相对速度分量和相对角速度是任意的。对象受到的运动约束如下式所示:

$$[0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] {}^c \dot{x}_{cf} = 0 \quad (3.9)$$

另外,在有摩擦点接触的情况下,虽然接触点处的相对速度为 0,但允许产生任意相对角速度,即对象的运动约束能够按下式描述:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} {}^c \dot{x}_{cf} = 0 \quad (3.10)$$

再有,在有摩擦面接触的情况下,由于所有的相对速度、相对角速度均受到约束,因此

有下式成立:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^c\dot{\mathbf{x}}_{\text{CF}} = 0 \quad (3.11)$$

将以上进行归纳后可知,根据对象物与手指的接触状态,作用于对象物运动的约束情况如下:

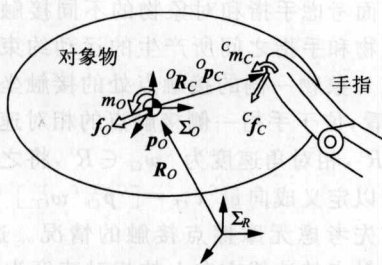
[接触点的运动约束]

$$\mathbf{H}^{\text{TC}} \dot{\mathbf{x}}_{\text{CF}} = 0 \quad (3.12)$$

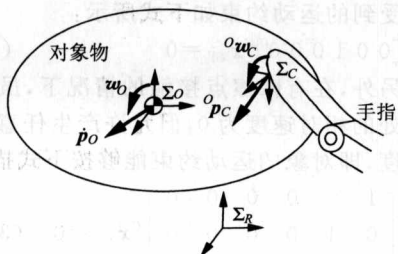
式(3.12)与表示对象物所受的接触力和力矩的式(3.8)构成对偶关系。显然,基于沿接触点处的接触力、力矩的方向上的相对运动受到约束的考虑自然会得出这种对偶关系的结论。

3.4.2 对象物的力学和运动学

下面介绍手指与对象物接触后位于对象物重心处产生的力、力矩、速度、角速度。为了讨论力和力矩,我们首先来考虑图 3.15(a) 的模型。图 3.15(a)中, Σ_o 是固定在对象物重心的坐标系。从参考坐标系 Σ_R 来看的 Σ_o 的原点位置及姿态旋转矩阵分别为 $\mathbf{p}_o \in \mathbb{R}^3$ 、 \mathbf{R}_o



(a) 位姿与力、力矩的关系



(b) 速度与角速度的关系

图 3.15 与对象有关的变量定义

$\in SO(3)$, 从对象物坐标系 Σ_o 观察的接触坐标系 Σ_c 的原点位置及姿态旋转矩阵分别为 ${}^o\mathbf{p}_c \in \mathbb{R}^3$ 、 ${}^o\mathbf{R}_c \in SO(3)$ 。由前一节的介绍得知,在接触点处对象物受到来自手指的接触力、力矩 ${}^c\mathbf{t}_c = [{}^c\mathbf{f}_c^T {}^c\mathbf{m}_c^T]^T$ 。该接触点的力、力矩作用的结果是在对象物重心产生如下式所示的力和力矩 $\mathbf{t}_o = [f_o^T m_o^T]^T$:

$$\mathbf{t}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & 0 \\ [\mathbf{p}_{oc} \times] \mathbf{R}_c & \mathbf{R}_c \end{bmatrix} {}^c\mathbf{t}_c \quad (3.13)$$

式中, $\mathbf{R}_c = \mathbf{R}_o^T {}^o\mathbf{R}_c$, $\mathbf{p}_{oc} = \mathbf{R}_o^T {}^o\mathbf{p}_c$, $[\mathbf{p}_{oc} \times]$ 为与外积等效的变形对象物矩阵,而对于 $\mathbf{p}_{oc} = [x_{oc} \ y_{oc} \ z_{oc}]^T$ 定义为

$$[\mathbf{p}_{oc} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -z_{oc} & y_{oc} \\ z_{oc} & 0 & -x_{oc} \\ -y_{oc} & x_{oc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

在式(3.13)中要注意, ${}^c\mathbf{t}_c$ 是从接触坐标系来进行观察的,而 \mathbf{t}_o 是从参考坐标系来进行观察的。手指与对象物之间的接触状态不同,对象物未必会受到手指产生的全部力和力矩,它们之间的关系用式(3.8)来描述,将式(3.8)代入式(3.13)中,对象物重心发生的力、力矩可以定义如下:

[对象物重心产生的力、力矩]

$$\mathbf{t}_o = \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{f}, \mathbf{f} \in \mathbf{FC} \quad (3.15)$$

式中,

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & 0 \\ [\mathbf{p}_{oc} \times] \mathbf{R}_c & \mathbf{R}_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

下面介绍图 3.15(b)所示的速度、角速度的关系。利用对象物重心的速度、角速度 $\dot{\mathbf{x}}_o = [\dot{\mathbf{p}}_o^T \dot{\boldsymbol{\omega}}_o^T]^T$ 来考虑接触点产生的速度及角速度,于是有定义

$${}^c\dot{\mathbf{x}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c^T & -\mathbf{R}_c^T [\mathbf{p}_{oc} \times] \\ 0 & \mathbf{R}_c^T \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_o \quad (3.17)$$

式中, ${}^c\dot{\mathbf{x}}_c$ 为接触坐标系表示的接触点处对象的速度、角速度,通过下式,可以进一步将之变换为从参考坐标系来观察的对象物速度、角速度:

$$\dot{\mathbf{x}}_c \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_c \end{bmatrix} {}^c\dot{\mathbf{x}}_c \quad (3.18)$$

利用式(3.16),则式(3.17)可以改写为

$${}^c\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{G}^T \dot{\mathbf{x}}_o \quad (3.19)$$

3.4.3 手指的力学及运动学

下面讨论手指施加关节转矩,手指接触

点发生力和力矩后,由手指运动在接触点所导致的速度和角速度。首先,为了研究力和力矩,我们考虑如图 3.16(a)所示的模型。图 3.16(a)中, Σ_L 表示固定在手指杆件上的杆件坐标系。从参考坐标系 Σ_R 来进行观察, Σ_L 的原点位置和姿态旋转矩阵分别为 $p_L \in R^3$ 和 $R_L \in SO(3)$ 。从杆件坐标系 Σ_L 来看的接触坐标系 Σ_C 的原点位置和姿态旋转矩阵分别为 ${}^L p_C \in R^3$ 和 ${}^L R_C \in SO(3)$ 。设从接触坐标系 Σ_C 来看的在接触点手指产生的力、力矩为 ${}^C t_F$,与此等效的、在杆件坐标系 Σ_L 的原点上的力和力矩可以用下式表示:

$$t_L = \begin{bmatrix} R_C & 0 \\ [p_{LC} \times] R_C & R_C \end{bmatrix} {}^C t_F \quad (3.20)$$

式中, $R_C = R_L {}^L R_C$, $p_{LC} = R_L {}^L p_C$ 。

然后,利用下式定义作用在杆件坐标系 Σ_L 的原点上的力、力矩 t_L 与关节转矩向量 $\tau = [\tau_1 \cdots \tau_n]^T$ 的关系:

$$\tau = J_L^T t_L \quad (3.21)$$

式中, J_L 为 Σ_L 原点的位置与姿势相对于关节位移的雅可比矩阵。根据手指与对象物的接触状态,手指在接触点产生的全部力、力矩的分量不一定会传递给对象物。通过将式

(3.8)、式(3.20)代入式(3.21)中,可以得到关节转矩与接触点产生的力、力矩存在有下列关系:

[关节转矩有关的关系式]

$$\tau = J^T H f, f \in FC \quad (3.22)$$

其中,

$$J^T = J_L^T \begin{bmatrix} R_C & 0 \\ [p_{LC} \times] R_C & R_C \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

下面研究如图 3.16(b)中所示的速度、角速度的关系。利用杆件坐标系 Σ_L 的原点的速度、角速度的关系 $\dot{x}_L = [\dot{p}_L^T w_L^T]^T$ 来考虑接触点处手指的速度和角速度,可定义如下:

$$\dot{x}_F = \begin{bmatrix} R_C^T & -R_C^T [p_{LC} \times] \\ 0 & R_C^T \end{bmatrix} \dot{x}_L \quad (3.24)$$

式中, \dot{x}_F 为接触坐标系 Σ_C 表示的接触点处手指的速度、角速度。利用下式可以将它变换为从参考坐标系观察的速度、加速度:

$$\dot{x}_F = \begin{bmatrix} R_C & 0 \\ 0 & R_C \end{bmatrix} \dot{x}_F \quad (3.25)$$

若利用式(3.23),则式(3.24)可以改写为

$$\dot{x}_F = J \dot{\theta} \quad (3.26)$$

式中, $\dot{\theta}$ 为关节角速度向量。

在本节的最后,我们来研究如何用公式来描述对象和手指之间在速度方面存在的约束问题。重心的速度、加速度与接触点处对象物的速度、加速度的关系可以用式(3.19)来表示。另外,接触点处手指的速度、角速度与关节速度的关系可以用式(3.26)来表示。在接触点处,手指的速度、角速度和对象物的速度、角速度的全分量并非完全一致,随着接触状态的不同,仅仅是被约束的方向分量的速度和角速度一致。该约束可以用式(3.12)来表示。在这里考虑成下式:

$$\dot{x}_{CF} = \dot{x}_F - \dot{x}_C \quad (3.27)$$

结果,根据式(3.12)、式(3.19)、式(3.26)、式(3.27),可以将对象物与手指之间运动所产生的约束描述如下:

[对象物与手指之间的运动约束]

$$H^T (J \dot{\theta} - G^T \dot{x}_0) = 0 \quad (3.28)$$

图 3.17 将迄今为止所得到的对象物与手指的速度、角速度,以及力、力矩有关的关系式作了汇总^[4]。

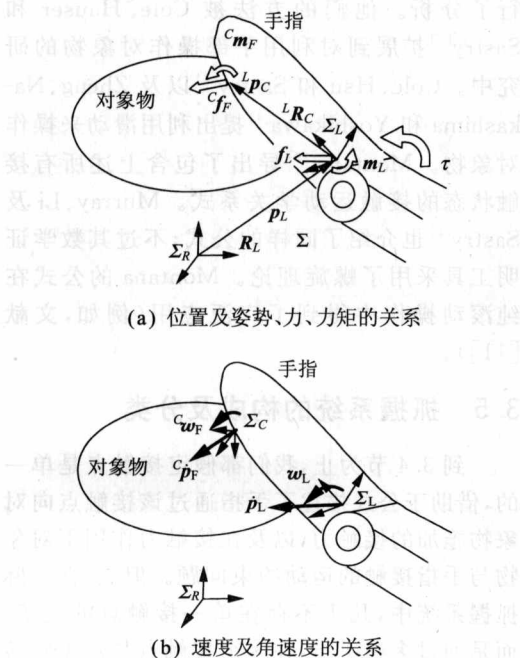


图 3.16 手指有关的变量定义

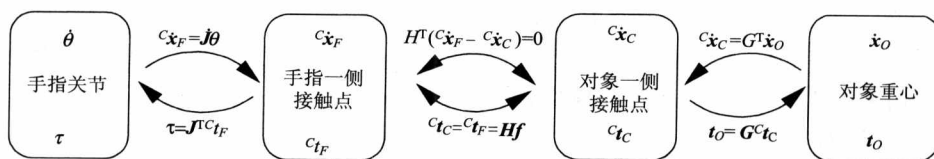


图 3.17 基本公式汇总

3.4.4 点接触的公式以及滑动和滚动 (补充说明)

在 3.4 节中定义了接触状态, 根据各类接触状态, 在公式中借助于不同的力螺旋基底来表示手指施加于对象物的接触力和力矩以及对象物与手指之间的运动约束。下面稍微偏离一点话题, 说明如何利用点接触集合的概念来表示手指与对象物接触的方法。虽然后续内容与这些内容不大有关系, 但基于本小节的方法也能够构成抓握系统, 实际上在很多研究中就是依据点接触概念建立公式的 (例如, 文献[5])。

如图 3.18 所示, 线接触和面接触可以近似为分别是 2 个以及 $s(s \geq 3)$ 个点接触的集合^[5]。

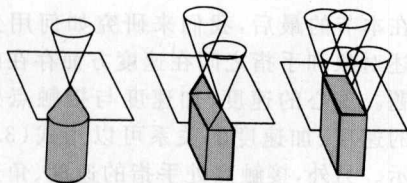


图 3.18 根据有摩擦点接触来描述接触

举例来说, 让我们将有摩擦点接触和有摩擦面接触作为有摩擦点接触的集合来考虑问题。这时, 对象重心产生的力、力矩可以用下式表示:

$$\begin{aligned} t_O &= \sum_{i=1}^s \tilde{G}_i \tilde{f}_i, \tilde{f}_i \in FC \\ &= \tilde{G} \tilde{f} \end{aligned} \quad (3.29)$$

其中,

$$\begin{aligned} \tilde{G} &= [\tilde{G}_1 \cdots \tilde{G}_s] \\ \tilde{f} &= [\tilde{f}_1^T \cdots \tilde{f}_s^T]^T \\ \tilde{G}_i &= \begin{bmatrix} R_{G_i} \\ [p_{OG_i} \times] R_{G_i} \end{bmatrix} \\ FC &= \{ \tilde{f}_i \in R^3 \mid \sqrt{\tilde{f}_{i1}^2 + \tilde{f}_{i2}^2} \leq \mu \tilde{f}_{i3}, \\ &\quad \tilde{f}_{i3} \geq 0 \} \end{aligned}$$

与关节转矩有关的关系式也可以用下式表示:

$$\begin{aligned} \tau &= \sum_{i=1}^s \tilde{J}_i^T \tilde{f}_i, \tilde{f}_i \in FC \\ &= \tilde{J}^T \tilde{f} \end{aligned} \quad (3.30)$$

其中,

$$\begin{aligned} \tilde{J}^T &= [\tilde{J}_1^T \cdots \tilde{J}_s^T] \\ \tilde{J}_i^T &= \tilde{J}_{Li}^T \begin{bmatrix} R_{G_i} \\ [p_{LG_i} \times] R_{G_i} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

根据本节所示的公式, 假定手指与对象物保持接触, 我们来讨论点接触、线接触、面接触的情况。除接触之外, 在接触点手指与对象物之间会存在滑动。此外, 如果手指和对象物的某个接触面为曲面, 那么在接触点处还可能会出现滚动(rolling)。在滚动中也可以划分为各种形态, 如不假设绕法线摩擦(扭转摩擦)的滚动、有扭转摩擦的纯滚动(pure rolling)、滑动-滚动同时发生等。Kerr 和 Roth^[6] 对不假设扭转摩擦的滚动运动学进行了分析。他们的方法被 Cole、Hauser 和 Sastry^[7] 扩展到对利用手部操作对象物的研究中。Cole、Hsu 和 Sastry^[8] 以及 Zheng、Nakashima 和 Yoshikawa^[9] 提出利用滑动来操作对象物。Montana^[10] 导出了包含上述所有接触状态的接触运动学关系式。Murray、Li 及 Sastry^[2] 也介绍了同样的公式, 不过其数学证明工具采用了螺旋理论。Montana 的公式在纯滚动操作中得到了广泛应用 (例如, 文献[11])。

3.5 抓握系统的构成及分类

到 3.4 节为止, 我们都假定接触点是单一的, 借助于公式描述了手指通过该接触点向对象物施加的接触力, 以及在接触力作用下对象物与手指接触的运动约束问题。但是, 在实际抓握系统中, 几乎不存在单一接触点的例子, 而是通过多根手指, 在多个接触点与对象物接触, 向对象物施加接触力。因此, 在本节中, 我们将用公式来描述多个接触点的抓握状况, 并根据公式对抓握系统进行分类。

3.5.1 抓握系统

下面介绍手部抓握对象物的形态问题,大致可以分为如图 3.19 所示的三种形态。在图 3.19(a)中,机器人手部不仅用指尖,而且用手指的内杆件和手掌来抓握对象物,称这样的抓握形态为包紧抓握(enveloping grasp)^[12]。包紧抓握的特征是手指以多个点与对象物接触,因此对象物的操作自由度受到限制;反之,抓握不容易因外部扰动而发生变化。在包紧抓握中,还有一种完全剥夺对象物运动自由度的抓握形态,有时特别地将它称为力度抓握(power grasp)^[13]。在如图 3.19(b)所示的抓握形态中,机器人手部仅用指尖与对象物接触,称这样的抓握形态为指尖抓握(fingertip grasp)。指尖抓握具有的特征是对象物的运动自由度多,可期望实现灵巧操作;反之,由于接触点少,抓握容易因外部扰动而发生变化。在如图 3.19(c)所示的形态中,机器人手部并无完全约束对象物;反之,机器人手部通过让对象物与环境接触来约束对象物,实现抓握。称这样的机器人手部在非完全约束对象物的状况下所实施的操作为非抓握操作(graspless manipulation)^[14]。

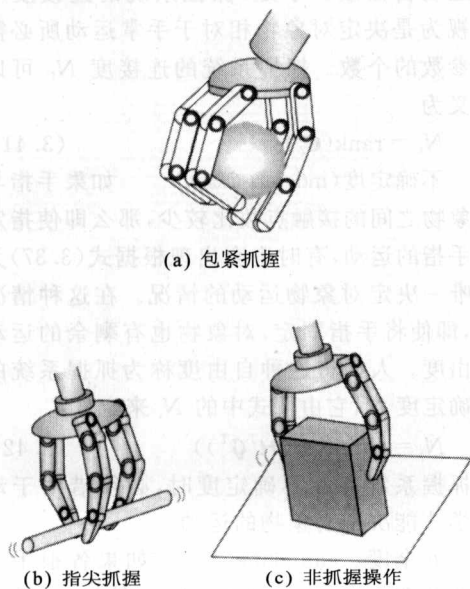


图 3.19 抓握形态的大致分类

在下面介绍抓握系统构成的内容时,我们基本上是围绕包紧抓握系统为对象物来展开。构成指尖抓握的抓握系统时,只要假定包紧抓

握中各根手指仅用其末端杆件与对象物接触即可,而对于利用环境构成抓握系统时,只要将环境简化成无关节的单根手指即可。

3.5.2 抓握系统的构成

下面介绍包紧抓握系统的构成问题。设机器人手部用 n 根手指抓握对象物。各根手指有 m_i 个关节及 k_i 个接触点。现在来关注第 i 根手指的第 j 个接触点。利用式(3.15),根据该接触点处手指向对象物施加的接触力,在对象物的重心处所产生的合力和力矩可以用下式表示:

$$t_{Oij} = G_{ij} H_{ij} f_{ij}, \quad f_{ij} \in FC_{ij} \quad (3.31)$$

式中, $G_{ij} \in R^{6 \times 6}$ 、 $H_{ij} \in R^{6 \times l_{ij}}$ 、 $f_{ij} \in R^{l_{ij}}$ 分别与式(3.15)中的 G 、 H 、 f 相对应, l_{ij} 表示力螺旋基底的维数。由第 i 根手指的全部接触点在对象物重心处产生的力及力矩,可通过将式(3.31)相加而得到,即

$$\begin{aligned} t_{Oi} &= \sum_{j=1}^{k_i} G_{ij} H_{ij} f_{ij} \\ &= G_i H_i f_i, \quad f_i \in FC_i \end{aligned} \quad (3.32)$$

其中,

$$\begin{aligned} G_i &= [G_{i1} \cdots G_{ik_i}] \in R^{6 \times 6k_i} \\ H_i &= \text{block diag}[H_{i1} \cdots H_{ik_i}] \in R^{6k_i \times L_i} \\ f_i &= [f_{i1}^T \cdots f_{ik_i}^T]^T \in R^{L_i} \\ L_i &= \sum_{j=1}^{k_i} l_{ij} \end{aligned}$$

进一步关于全部手指,通过将式(3.32)相加,可以求出在对象物重心所发生的力、力矩的总和。

[对象物重心发生的力、力矩]

$$\begin{aligned} t_o &= \sum_{i=1}^n G_i H_i f_i \\ &= GHF, \quad F \in FC \end{aligned} \quad (3.33)$$

其中,

$$\begin{aligned} G &= [G_1 \cdots G_n] \in R^{6 \times 6K} \\ H &= \text{block diag}[H_1 \cdots H_n] \in R^{6K \times L} \\ F &= [f_1^T \cdots f_n^T]^T \in R^L \\ L &= \sum_{i=1}^n L_i \\ K &= \sum_{i=1}^n k_i \end{aligned}$$

类似地,可以推导出关节转矩关系式。现在来关注第 i 根手指的第 j 个接触点。根据式(3.22),在第 i 根手指的第 j 个接触点处,使手指施加接触力所必需的关节转矩可以用下式表示:

$$\tau_{ij} = J_{ij}^T H_{ij} f_{ij}, f_{ij} \in FC_{ij} \quad (3.34)$$

式中, $J_{ij}^T \in R^{m_i \times 6}$ 、 $H_{ij} \in R^{6 \times l_{ij}}$ 、 $f_{ij} \in R^{l_{ij}}$ 分别与式(3.22)中的 J^T 、 H 、 f 相对应。为了产生第 i 根手指所应该具有的全部接触点的力和力矩,必需的关节转矩可以通过将式(3.34)相加得到:

$$\begin{aligned} \tau_i &= \sum_{j=1}^{k_i} J_{ij}^T H_{ij} f_{ij} \\ &= J_i^T H_i f_i, f_i \in FC_i \end{aligned} \quad (3.35)$$

其中,

$J_i^T = [J_{i1}^T \cdots J_{ik_i}^T] \in R^{m_i \times 6k_i}$
进一步关于全部手指,通过将式(3.35)相加,可以求出关节转矩与手指在接触点处向对象物所施加的力、力矩的关系式。

[关节转矩有关的关系式]

$$\tau = J^T H F, F \in FC \quad (3.36)$$

其中,

$$J^T = \text{block diag}[J_1^T \cdots J_n^T] \in R^{M \times 6K}$$

$$\tau = [\tau_1^T \cdots \tau_n^T]^T \in R^M$$

$$M = \sum_{i=1}^n m_i$$

最后,在抓握系统中,可以利用式(3.28)将对象物与手部的运动约束关系推导出来。

[对象物与手部的运动约束]

$$H^T (\dot{\Theta} - g^T \dot{x}_0) = 0 \quad (3.37)$$

其中,

$$\Theta = [\theta_1^T \cdots \theta_n^T]^T \in R^M$$

$\Theta_i \in R^{m_i}$ 表示第 i 根手指的关节位移向量。

3.5.3 抓握系统中的运动约束

在3.5.1节中,叙述了将抓握系统大致分为三类的方法,而在本节中我们将着眼于对象与手部在接触时所发生的运动约束,介绍抓握系统更为详细的分类^[15]。首先,针对 $\dot{\Theta}$ 和 \dot{x}_0 求解式(3.37),从而得到下式:

$$\dot{\Theta} = C_1 \dot{\phi} \quad (3.38)$$

$$\dot{x}_0 = C_2 \dot{\phi} \quad (3.39)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = (I_L - B^+ B)$$

$$B = [H^T J - H^T g^T]$$

式中, I_L 为 $L \times L$ 单位矩阵; $\phi \in R^L$ 为任意向量; $*$ 为 $*$ 伪逆矩阵。据此便能够按照如下

方式来描述抓握系统的特征。

能动度(mobility) 在机构学中,所谓的能动度被定义为“完全决定系统中全部杆件位置所必需的独立参数的个数”^[16]。具体到抓握系统的能动度,就是决定抓握系统所必需的参数的个数,若能够按照能动度的数量来确定参数,我们就能够描述包括对象物和手部在内的系统的运动。能动度无非就是式(3.38)和式(3.39)中的 $[\dot{\Theta}^T \dot{x}_0^T]^T$ 所占空间的维数。根据式(3.37)~式(3.39),抓握系统的能动度 N_m 可以定义为

$$\begin{aligned} N_m &= \text{rank} \left(\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \right) \\ &= \dim(\text{Ker}(B)) \end{aligned} \quad (3.40)$$

式中, $\text{Ker}(B)$ 表示 B 的零空间。

连接度(connectivity) 关注机构内的两个特别的杆件,在决定两者相对位置关系的指标中就有所谓的连接度。机构学中关于连接度的定义是“决定系统中任意两个杆件的相对位置所必需的参数的个数”^[16]。具体到手部操作对象物,与抓握系统具有的全部运动自由度相比,在多数情况下人们更加感兴趣的是对象物相对于手部手掌(palm)的相对运动自由度。于是,抓握系统的连接度可以视为是决定对象物相对于手掌运动所必需的参数的个数。抓握系统的连接度 N_c 可以定义为

$$N_c = \text{rank}(C_2) \quad (3.41)$$

不确定度(indeterminacy) 如果手指与对象物之间的接触点数比较少,那么即使指定了手指的运动,有时也会出现根据式(3.37)无法唯一决定对象物运动的情况。在这种情况下,即使将手指固定,对象物也有剩余的运动自由度。人们将这种自由度称为抓握系统的不确定度^[15],它由下式中的 N_i 来定义:

$$N_i = \dim(\text{Ker}(H^T g^T)) \quad (3.42)$$

当抓握系统存在不确定度时,必须借助于动力学才能决定对象物的运动。

冗余度(redundancy) 如果各根手指的关节数很多,或者在指尖抓握等场合,手指关节虽然具有速度,但是并未影响到对象物的速度、角速度的变化。人们将此时手指关节速度的维数称为抓握系统的冗余度^[15],它由下式中的 N_r 来进行定义:

$$N_r = \dim(\text{Ker}(\mathcal{H}^T \mathcal{J})) \quad (3.43)$$

下面针对这些定义作一些补充说明。首先,若不确定度、冗余度均为零($N_i = N_r = 0$),那么关节速度与对象物速度、角速度之间就有一一对应的关系成立,即给定关节速度后,能求解出唯一的对象物速度和角速度。另外,能够唯一地决定满足对象物希望的速度、角速度的关节速度。如果纵然是给出了关节驱动转矩,以及施加于对象物重心的接触力的大小,抓握系统有时仍然具有不确定性(indeterminacy)^[13],不过此时的不确定度与上述不确定度在概念上有所区别。如前所述,本节所涉及的各项定义是根据手部与对象物的运动约束推导出来的,而实际上,也可以用Grübler公式从另一个角度来完成类似的定义。例如:

$$N_m \geq \sum_i a_i + \sum_j b_j - 6S$$

$$N_i \geq \sum_i a_i - 6S$$

式中, a_i 为第*i*个关节的自由度; b_j 为第*j*个接触点的自由度(表3.2); S 为系统中包含的独立回路数。

图3.20介绍3根手指(每根手指有3个自由度)的指尖,在有摩擦点接触条件下抓握一个对象物的情况,于是就有 $N_m = N_c = l_0$, $N_i = N_r = 0$, 假定每一根手指的自由度为4个,那么该手指可以在不影响对象物运动的前提下改变对象物的姿态,结果变成 $N_m = 7$, $N_c = 6$, $N_i = 0$, $N_r = 1$ 。如果用2根手指,每根手指有3个自由度,在有摩擦点接触的条件下进行抓握,此时无法构成对围绕连接2根手指的接触点之间的线段做旋转运动的约束,于是变为 $N_m = N_c = 6$, $N_i = 1$, $N_r = 0$ 。

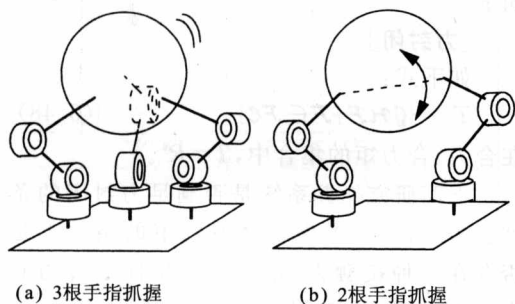


图3.20 用3个自由度手指实现抓握

Manipulable Grasp 我们还可以从操作的角度对抓握系统进行分类。现在我们来

观察对象物和手部提供的运动约束(式(3.37))。这时,将通过手指运动能够生成所有对象物运动 \dot{x}_0 的抓握系统称为 manipulable grasp^[3]。该条件可以描述如下:

$$\text{Im}(\mathcal{H}^T \mathcal{G}^T) \subset \text{Im}(\mathcal{H}^T \mathcal{J}) \quad (3.44)$$

式中, $\text{Im}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的值域。本条件是运动学的条件,即能够使对象物产生任意运动的必要条件。至于必要充分条件,则必须考虑接触点处的摩擦等力学条件。

例如,图3.20所示,用3根各有3个自由度的手指构成的以有摩擦点接触的形式抓握对象物的系统就是一个 manipulable grasp,若改成2根手指,则不构成 manipulable grasp。

内力(internal force) 在数根手指抓握对象物的场合,有时即使对象物没有加速度,也能使作用在对象物上的接触力增加。例如,在图3.21所示的抓握中,2根手指以有摩擦点接触抓握对象物,若在连接各根手指接触点的线段内对各根手指施加彼此抗衡的力,则对象物不加速,接触力却增加。我们将接触力中不使对象加速的分量称为内力^[3,28]。在式(3.33)中,若 $\mathcal{F} \in \mathcal{FC}$ 始终满足 $t_0 = 0$, 则该 \mathcal{F} 为内力。即内力可定义为^[3]

$$\mathcal{F}_i \in \text{Ker}(\mathcal{G}\mathcal{H}) \cap \mathcal{FC} \quad (3.45)$$

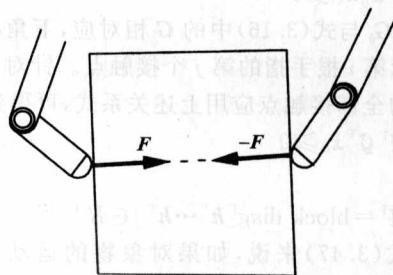


图3.21 用2根手指抓握的内力

3.6 形封闭(form closure)和力封闭(force closure)

下面介绍机器人手部抓握对象物的情况。这时重要的问题是让手指约束对象物,剥夺对象物的运动自由度。在本节中,我们将介绍形封闭和力封闭,它们是机器人手部用来约束对象物的重要概念,

3.6.1 形封闭

所谓形封闭,是在无摩擦的假设下,利用

几何学约束来完全剥夺物体的自由度^[18]。Reuleaux^[11]证明了在二维的情况下最小需要4个无摩擦的点接触才能实现形封闭。这个概念被Lakshminarayana^[12]扩展到三维,他阐明剥夺物体的6个自由度至少必须具有7个无摩擦的点接触。这些概念并非以主动建立无摩擦状态为前提,而是说约束条件不必考虑不确定的摩擦。所谓形封闭可以认为是在物理上和数学上对完全剥夺物体自由度,即所谓的“抓取”的概念作了再定义^[18]。

下面推导形封闭的基本公式。设在接触点处对象物与手指进行无摩擦点接触。在本节之前的介绍中,一直假设对象物与手指始终保持接触,而在本节的介绍中,将假定允许对象物离开手指,尽管如此,对象物却不能进入手指的内部。实际上,考虑到手指向对象物施加几何上的约束,因此即使假定手指没有速度,也不失一般性,即在式(3.26)中有 ${}^F\dot{\mathbf{x}}_F=0$ 。由式(3.9)和式(3.27),在各个接触点有下式的条件成立:

$$\mathbf{h}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}}_0 \geq 0$$

其中,

$$\mathbf{h}^T = [001000]$$

再考虑式(3.19),则可得

$$\mathbf{h}^T \mathbf{G}_{ij}^T \dot{\mathbf{x}}_0 \geq 0 \quad (3.46)$$

式中, \mathbf{G}_{ij} 与式(3.16)中的 \mathbf{G} 相对应,下角标的 ij 表示第 i 根手指的第 j 个接触点。针对全部手指的全部接触点应用上述关系式,可得到

$$\mathbf{\Pi}^T \mathbf{g}^T \dot{\mathbf{x}}_0 \geq 0 \quad (3.47)$$

其中,

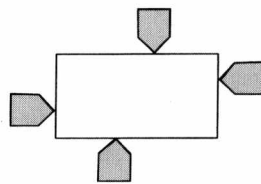
$$\mathbf{\Pi}^T = \text{block diag}[\mathbf{h}^T \cdots \mathbf{h}^T] \in R^{6K \times KN}$$

对于式(3.47)来说,如果对象物的运动自由度完全被剥夺,那么就实现了形封闭。形封闭的条件可描述如下:

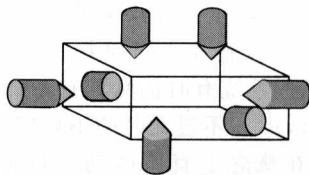
[形封闭]

满足式(3.47)的解仅仅是 $\dot{\mathbf{x}}_0 \geq 0$ 。

例如,对于长方体,二维条件下实现形封闭需要4个接触点,在三维条件下实现形封闭需要7个接触点。图3.22给出各自的配置情况。关于检验抓握系统是否是形封闭的方法,学者们开展了许多研究,例如文献[17]提出根据凸多面锥体理论的数值法来求解式(3.47)的方法。



(a) 二维



(b) 三维

图 3.22 形封闭的例子

3.6.2 力封闭

在介绍力封闭之前,先假定手部仅用指尖抓握对象物(即指尖抓握),而相应于接触形态,各根手指具有需要的关节数,能够满足产生必需的接触力、力矩的要求。这里所需要的关节数,例如手指与对象在接触点属于有摩擦点接触条件下,这个数目是3;在有摩擦面接触条件下,这个数目是6,与力螺旋基底的维数一致。

在力封闭中维持平衡的条件是,在给定接触点处利用手指(允许具有静摩擦约束,包含无摩擦)施加的接触力与作用于物体的任意外力和外力矩相抗衡。另外,在上述有关指尖抓握的假定之下,力封闭不仅保证能够与任意外力相抗衡,而且能够让物体产生任意加速度。利用式(3.33),力封闭可以定义如下^[17]。

[力封闭]

如下式:

$$\mathbf{T} = \{\mathbf{g}\mathbf{H}\mathbf{F} | \mathbf{F} \in \mathbf{F}_c\} \quad (3.48)$$

在合力、合力矩的集合中, $\mathbf{T} = R^6$ 。

下面研究抓握系统是否满足力封闭的条件。为此,必须考虑在摩擦约束的条件下是否存在一种接触力,它能够产生任意合力和合力矩。为了证明这一点需要使用下述定理。

[产生任意合力的接触力的存在条件]

在 $\mathcal{F} \in \mathcal{FC}$ 的约束之下, 存在满足 $T=R^6$ 的接触力 \mathcal{F} 的必要充分条件是存在能够产生线性独立的 6 个合力、合力矩 $\hat{t}_i (i=1, \dots, 6)$ 及其反方向的 $-\hat{t}_i (i=1, \dots, 6)$ 的 $\mathcal{F} \in \mathcal{FC}^{[21,22]}$ 。

因此, 从上述 12 个合力、合力矩, 按照数理规划问题求解满足式(3.48)的 \mathcal{F} , 如果这个解存在的话, 就可以认为是力封闭。

由表 3.3 可知, 问题在于接触点的摩擦约束 $\mathcal{F} \in \mathcal{FC}$ 是非线性的。文献[21]中提出一种方法, 通过逐次二次规划法, 在 $\mathcal{F} \in \mathcal{FC}$ 保持非线性约束的前提下求解式(3.48)。不过本节所介绍的方法与此不同, 是将摩擦约束近似线性化^[5,6,17,18], 回到简单线性规划问题上^[18]。

在有摩擦点接触的情况下, 摩擦约束如图 3.23(a) 所示, 是指接触力落入摩擦锥内, 将摩擦锥用图 3.23(b) 所示的正 S 面锥体近似。图 3.23(b) 中, S 面锥体的棱线正好与原来的圆锥体重合。于是, 沿第 S 条锥线的单位向量 v_s 可用下式表示:

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + 1}} e_3 + \frac{\mu}{\mu^2 + 1} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{L} s\right) e_1 + \cos\left(\frac{2\pi}{L} s\right) e_2 \right] \quad (3.49)$$

摩擦锥用多面锥体近似后, 第 i 根手指的第 j 个接触点的接触力可用下式表示:

$$f_{ij} = v_j \lambda_{ij}, \lambda_{ij} \geq 0 \quad (3.50)$$

其中,

$$V = [v_1 \dots v_s] \in R^{3 \times S}$$

$$\lambda_{ij} = [\lambda_{ij1} \dots \lambda_{ijs}]^T \in R^S$$

式中, $\lambda_{ijs} (s=1, \dots, S)$ 表示接触力沿第 s 条棱线方向的分量。对于全部接触点求式(3.50), 得到下式:

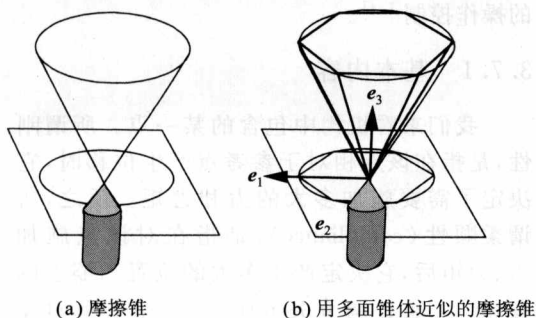


图 3.23 用多面锥体近似的摩擦锥

$$\mathcal{F} = v \lambda, \lambda \geq 0 \quad (3.51)$$

其中,

$$v = \text{block diag}[V \dots V] \in R^{3K \times SK}$$

$$\lambda = [\lambda_{11}^T \dots \lambda_{rn}^T]^T \in R^{SK}$$

由上述可知, 讨论抓握系统是否满足力封闭, 等于考虑下述线性规划问题。

[力封闭的确认]

对于线性独立的 6 个合力、合力矩 $\hat{t}_i (i=1, \dots, 6)$ 及其反方向的 $-\hat{t}_i (i=1, \dots, 6)$, 存在全部满足下式的 λ :

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } z = \alpha^T \lambda \\ & \text{Subject to} \\ & \hat{t}_i = g \mathcal{H} v \lambda \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (3.52)$$

式中, α 为适当的列向量。

本方法用与圆锥体内接的多面锥体来近似摩擦锥。对于原本满足力封闭的抓握, 如果用面数比较少的面锥体, 粗略地近似, 那么可能会发生线性规划问题无解的情况。不过反过来, 由于近似多面锥体位于实际圆锥体的内侧, 因此如果它存在线性规划问题的解, 那么就一定属于力封闭。

以二维平面内用有摩擦点接触的 2 根手指抓握长方形对象的情况为例加以研究^[23]。图 3.24(a) 表示连接接触点的线段落入两个接触点的摩擦锥内, 因此满足力封闭的条件。图 3.24(b) 则表示连接接触点的线段落在摩擦锥外, 因此不能满足力封闭的条件。这时, 即使想牢牢抓握住对象, 在接触点处也会产生滑动。

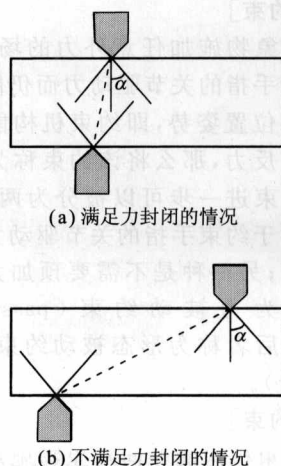


图 3.24 2 根手指抓握的二维力封闭

下面的三个条件^[3]是与式(3.52)确认形封闭等效的:

① 矩阵 $(G\mathbf{H})$ 的列向量生成的凸锥体充满 R^6 。

② 矩阵 $(G\mathbf{H})$ 的列向量集合的凸点包含原点。

③ 不存在与矩阵 $(G\mathbf{H})$ 的列向量的内积全部为大于等于0的向量 $\mathbf{v} \in R^6$ 。

另外,力封闭与内力的关系可描述如下^[3]。

[内 力]

抓握构成力封闭的必要充分条件是,矩阵 $(G\mathbf{H})$ 设定满射,并且存在内力 $\mathbf{F}_1 \in \text{Ker}(G\mathbf{H}) \cap \mathcal{F}_c$ 。

3.6.3 被动约束和主动约束

从力封闭的定义,在本手册中设定,为了指尖产生接触力、力矩,手部拥有必需的关节数。如果该假定不成立,例如借助于环境抓握对象物时,或者实施抓握手指的自由度不够时,或者在包紧抓握时,虽然对象物受到来自任意方向的外部扰动而抓握未被破坏,手部也未必能够在对象物重心产生任意的合力、合力矩。例如,对象物与环境接触时,沿该接触点的法线方向,对象物能够承受任意大小的外部扰动,但无法产生沿该法线方向的加速度。因此,有人提出被动约束(passive closure)和主动约束(active closure)^[22]的概念,从更广义的角度对上述形封闭和力封闭进行了重新定义,

[被动约束]

在向对象物施加任意外力的场合,如果不改变约束手指的关节驱动力而仍能保持对象物已有的位置姿势,即约束机构能产生与外力平衡的反力,那么将该约束称为被动约束。被动约束进一步可以被分为两种:一种是必须借助于约束手指的关节驱动力或重力施加预加力;另一种是不需要预加力。我们将前者称为力被动约束(passive force closure),将后者称为形态被动约束(passive form closure)。

[主动约束]

如果约束机构能够向对象物施加任意的合力、合力矩,那么该约束被称为主动约束。

下面举一个简单的一维问题来建立这一

概念^[22]。在图3.25中,图3.25(a)借助于固定于环境中的两个无关节手指约束对象物,图3.25(b)将图3.25(a)中的一根手指改成单自由度关节。图3.25(c)中的2根手指均被改成单自由度关节。由图3.25可知,图3.25(a)不改变关节驱动力也能与外力相抗衡,因此属于形态被动约束;图3.25(b)必须从右面的手指预先施加关节驱动力,因此属于力被动约束;至于图3.25(c),对象物能够沿左右方向施加任意合力,因此属于主动约束。文献[26]建立了主动约束的公式,该公式考虑了手指关节的影响。另外,力被动约束的概念与机器人手部力度抓握的概念是有关联的^[22]。在力度抓握中,有时在接触力中含有既不对合力、力矩产生影响,又不对关节驱动转矩产生影响的分量,因此很难开展对接触力的分析^[13]。采用力度抓握的目的在于要完全地约束对象物,许多研究都涉及这个课题(例如,文献[5],[13])。

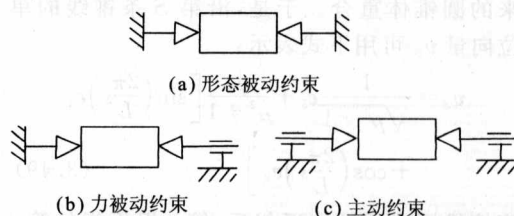


图 3.25 一维的主动与被动约束^[22]

3.7 刚性控制

本节介绍对抓握对象物实施操作的有关情况。在此之前,关于对象物的运动控制律,人们开展了许多研究(例如,文献[1],[3],[4],[7]~[9],[11],[22])。下面介绍其中基本的、比较容易理解的基于刚性(stiffness)控制的操作控制^[1,4]。

3.7.1 基本内容

我们来看机构中包含的某一点。所谓刚性,是指在该点相对于参考点产生位移时,它决定了需要施加多大的力和力矩。反之,所谓柔顺性(compliance),是指在对该点施加力、力矩后,它决定产生多大的位置和姿态的变化^[1]。通过调节关节刚性,在指尖或对象重心实现所希望的动作,这就是刚性控制的基本思想。

首先用一维的例子进行介绍。一维弹簧的位移 δx 与产生位移所必需的力 f 的关系可用下式表示:

$$f = k\delta x \quad (3.53)$$

式中, k 表示刚性。若刚性为正, 则产生位移时所加的力 f 起到恢复力的作用。

现在, 针对单根手指向对象物施加力、力矩的情况来研究上述关系式。假定用一根手指的指尖接触对象物, 同时假设, 如果其他各根手指以不同的接触形态产生接触, 它们能满足产生给定的接触力和力矩所必需的关节数。这里, 所谓必需的关节数, 例如在接触点手指与对象物进行有摩擦点接触时为 3 个关节, 在有摩擦面接触时为 6 个关节, 这一点与力螺旋基底的维数是等效的。按照接触形态指尖能够向对象物施加的力和力矩 f , 以及与指尖对应的位移 δx 的关系可用下式表示(图 3.26):

$$f = K_F \delta x \quad (3.54)$$

式中, 若 K_F 为正定矩阵, 则 f 起到恢复力和恢复力矩的作用。若 K_F 为正定, 则利用正则矩阵 C 通过下式进行变换(congruence transformation):

$$K = C^T K_F C \quad (3.55)$$

所生成的矩阵 K 也为正定。基于这一想法, 借助于关节驱动转矩就能实现对指尖所指定的刚性。

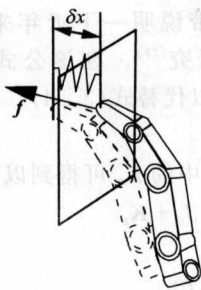


图 3.26 力与位移的关系

首先, 将式(3.22)及与式(3.26)相对应的微位移有关的关系式用下式表示:

$$\tau = J^T H f \quad (3.22)$$

$$\delta x \cong H^T J \delta \theta \quad (3.56)$$

根据式(3.54)、式(3.22)和式(3.56), 可以实现指尖指定的刚性。例如, 单指刚性控制律可推导如下。

[刚性控制律(单指)]

$$\begin{aligned} \tau &= J_\theta^T K_F J_\theta \delta \theta \\ &= K_\theta \delta \theta \end{aligned} \quad (3.57)$$

式中, $J_\theta = H^T J$ 。如果手指的关节数等于指尖产生给定的力和力矩所必需的最低数时, J_θ 为正方矩阵, 此时, 若能产生必要的力及力矩时, J_θ 则为正则矩阵。由式(3.55)可知, 关节级就能起到恢复力的作用, 因此可以将式(3.57)作为操作控制律。人们知道, 在手指具有冗余性时, 同样可以根据式(3.57)的控制律得到关节级的恢复力^[1]。为了避免手指与对象物之间产生滑动, 有时手指还向对象物施加一个偏置力(bias force) f_{bias} 。这时的刚性控制律如下式所示:

$$\tau = K_\theta \delta \theta + J_\theta^T f_{\text{bias}} \quad (3.58)$$

3.7.2 向抓握系统扩展

1. 基本公式推导

下面介绍用多根手指抓握对象物的情况。这时要解决的问题是如何利用关节的驱动转矩实现对对象物重心位置姿势的给定刚性。这里首先将前一节的公式向具有 n 根手指的手部借助于该 n 根手指操作对象物的情况扩展(图 3.27)。

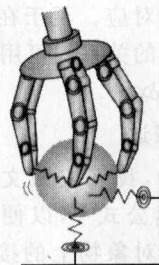


图 3.27 抓握系统的柔顺控制

向接触点施加接触力所必需的关节转矩可用下式表示:

$$\tau = J^T H F \quad (3.59)$$

其中,

$$J^T = \text{block diag}[J_1^T \cdots J_n^T] \in R^{M \times 6n}$$

$$H = \text{block diag}[H_1 \cdots H_n] \in R^{6n \times L}$$

$$\tau = [\tau_1^T \cdots \tau_n^T]^T \in R^M$$

$$F = [f_1^T \cdots f_n^T]^T \in R^L$$

$$M = \sum_{i=1}^n m_i$$

$$L = \sum_{i=1}^n l_i$$

$J_i \in R^{6 \times m_i}$ 、 $H_i \in R^{6 \times l_i}$ 、 $\tau_i \in R^{m_i}$ 、 $f_i \in R^{l_i}$ 分别表示第 i 根手指的、与指尖位姿的关节位移有关的雅可比矩阵、力螺旋基底、关节驱动转矩向量,以及按照接触状态能够施加的接触力和力矩向量,一一与单指的公式即式(3.22)中的 J 、 H 、 τ 、 f 相对应。

接触点指尖处的微位移与关节微位移之间有如下式所示的关系成立:

$$\delta \mathbf{x} \cong \mathbf{H}^T \mathbf{J} \delta \boldsymbol{\theta} \quad (3.60)$$

其中,

$$\delta \mathbf{x} = [\delta x_1^T \cdots \delta x_n^T]^T \in R^L$$

$$\delta \boldsymbol{\theta} = [\delta \theta_1^T \cdots \delta \theta_n^T]^T \in R^M$$

$\delta x_i \in R^{l_i}$ 和 $\delta \theta_i \in R^{m_i}$ 分别为第 i 根手指的指尖位移向量和关节位移向量,分别与式(3.56)中的 δx 及 $\delta \theta$ 相对应。

在接触点向对象物施加的接触力、力矩,与对象物重心处产生的合力、力矩之间的关系式可用下式表示:

$$\mathbf{t}_0 = \mathbf{G} \mathbf{H} \mathbf{F} \quad (3.61)$$

其中,

$$\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1 \cdots \mathbf{G}_n] \in R^{6 \times 6n}$$

$\mathbf{G}_i = R^{6 \times 6}$ 为向量,由第 i 根手指在接触点的力、力矩变换到重心的力、力矩而得到,与单指的式(3.16)相对应。至于在接触点处对象物位移与重心位移的关系式可用下式表示:

$$\delta \mathbf{x} \cong \mathbf{H}^T \mathbf{G}^T \delta \mathbf{x}_0 \quad (3.62)$$

2. 内力的表达

在本小节中,我们按照文献介绍的方法求出内力的表达式^[1],以便在刚性控制中应用。手指加在对象物上的接触力、力矩,以及在对象物重心发生的力、力矩之间的关系式可用式(3.61)表示,考虑到属于矩阵 $\mathbf{G} \mathbf{H}$ 的零空间的单位向量 $\mathbf{c}_i = R^L$ ($i = 1, \dots, r$),有下式:

$$r = \dim(\text{Ker}(\mathbf{G} \mathbf{H})) \quad (3.63)$$

由于下式成立:

$$\mathbf{G} \mathbf{H} \mathbf{c}_i = 0 \quad (i = 1, \dots, r) \quad (3.64)$$

于是可知, $\mathbf{c}_i = R^L$ 不产生合力和力矩,而其属于内力分量。由于 \mathbf{c}_i 为单位向量,因此手指向对象物施加的接触力和力矩 \mathbf{F} 在被给定的条件下,内力的大小可表示为

$$\gamma_i = \mathbf{c}_i^T \mathbf{F} \quad (i = 1, \dots, r) \quad (3.65)$$

合并上述的式(3.61)与式(3.65),得到

$$\begin{bmatrix} t_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} \mathbf{H} \\ \mathbf{c}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{c}_r^T \end{bmatrix} \mathbf{F} \quad (3.66)$$

式中,右边第一项的矩阵为正则矩阵,因此式(3.66)可改写为

$$\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-T} \mathbf{F} \quad (3.67)$$

另外,与式(3.67)进行的变形相对应,将式(3.62)变形为

$$\delta \mathbf{x} \cong \mathbf{W}^{-1} \delta \mathbf{x}_0 \quad (3.68)$$

式中, $\delta \mathbf{x}_0 = [\delta x_0^T 0 \cdots 0]^T \in R^L$ 。在 $\delta \mathbf{x}_0$ 的定义中,位于后面的 0 相当于在柔性对象物的场合中,由于对象物被压缩而产生的对象物的弹性位移项^[1]。在本手册中,对象物设定为完全的刚体,故代入 0。

3. 刚性控制律

首先,针对对象物重心产生的合力、力矩、内力,设定刚性如下:

$$\mathbf{A} = \mathbf{K}_0 \delta \mathbf{x}_0 \quad (3.69)$$

根据式(3.59)、式(3.60)、式(3.67)、式(3.68)及式(3.69),推导刚性控制律如下:

[刚性控制律(抓握系统)]

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{W}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{W} \mathbf{J}_\theta \delta \boldsymbol{\theta} \\ &= \mathbf{K}_\theta \delta \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (3.70)$$

式中, $\mathbf{J}_\theta = \mathbf{H}^T \mathbf{J}$ 。如果还打算施加偏置力 \mathbf{A}_{bias} , 只要用下式代替式(3.70)即可:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_\theta \delta \boldsymbol{\theta} + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{W}^T \mathbf{A}_{\text{bias}} \quad (3.71)$$

最后,附带说明一下近年来围绕刚性控制所开展的研究^[29]。在该公式推导的过程中,定义下式以代替式(3.54):

$$\delta \mathbf{f} = \mathbf{K}_F \delta \mathbf{x}$$

于是式(3.57)中的 \mathbf{K}_θ 可得到以下的形式:

$$\mathbf{K}_\theta = \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{K}_F \mathbf{J}_\theta + \mathbf{K}_g$$

其中,

$$\mathbf{K}_g = \frac{\partial (\mathbf{J}_\theta^T \mathbf{f})}{\partial \boldsymbol{\theta}^T}$$

在式(3.54)中,接触力为 0 的点即为弹簧的中立点,不过本公式的特点是,可以将 0 以外的点作为中立点。

在 3.7.2 节 2. 中定义了内力。只要单位向量 $\mathbf{c}_i \in R^L$ 属于矩阵 $\mathbf{g} \mathbf{H}$ 的零空间,那么它基本上就被允许任意设定。对此,文献[22], [28]中定义了有明确物理意义的内力,并对其进行了分析。

3.8 动态控制

在刚性控制中,控制律中并未考虑动态特性,因此如果要求对象物能实现高速、高精度轨迹跟踪,那么更有效的方法是采用以下所示的动态控制^[22]。

与前面刚性控制的情况相同,假设机器人手部用指尖与对象物接触,同时按照接触状态,手指具有足够的关节数以便产生所必需的接触力和力矩。这样,就可以适当引用3.7.2节的1.中定义的公式。

采用速度变量 $\dot{\mathbf{x}}_0 = [\dot{\mathbf{p}}_0^T \dot{\boldsymbol{\omega}}_0^T]^T$, 以及与该速度变量相对应的合力、合力矩 \mathbf{t}_0 , 于是对象物的动态特性为

$$\mathbf{M}_0 \ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{h}_0(\mathbf{p}_0, \mathbf{R}_0, \dot{\mathbf{p}}_0, \dot{\boldsymbol{\omega}}_0) = \mathbf{t}_0 \quad (3.72)$$

式中,例如当取对象物的质心为 Σ_0 的原点时,则有

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} m_0 \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}_0 = \begin{bmatrix} -m_0 \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\omega}_0 \times (\mathbf{H}_0 \boldsymbol{\omega}_0) \end{bmatrix}$$

式中, m_0 、 \mathbf{H}_0 及 \mathbf{g} 分别为对象物的质量、从 Σ_R 看到的惯性张量及重力加速度向量。

在考虑控制律时,为了表示对象物的姿态变化速度,比较方便的是采用横摇、俯仰、偏转的三维姿态向量 $\boldsymbol{\phi} \in R^3$ 的微分值 $\dot{\boldsymbol{\phi}}$, 以代替角速度向量 $\boldsymbol{\omega}_0$ 。若引入 $\mathbf{r}_0 = [\mathbf{p}_0^T \boldsymbol{\phi}^T]^T$ 来表示对象的位姿,则 $\dot{\mathbf{r}}_0$ 与 $\dot{\mathbf{x}}_0$ 的相关关系如下:

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{T}(\mathbf{r}_0) \dot{\mathbf{r}}_0 \quad (3.73)$$

其中,

$$\mathbf{T}(\mathbf{r}_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{T}_r(\mathbf{r}_0) \end{bmatrix}$$

\mathbf{T}_r 为将横摇、俯仰、偏转等3个变量的微分值变换为角速度向量 $\boldsymbol{\omega}_0$ 的矩阵^[30]。若用 \mathbf{r}_0 表示前面给出的对象物的动态特性,即式(3.72),则为

$$\mathbf{M}_0 \mathbf{T} \ddot{\mathbf{r}}_0 + \mathbf{h}_{0r}(\mathbf{r}_0, \dot{\mathbf{r}}_0) = \mathbf{t}_0 \quad (3.74)$$

式中, \mathbf{h}_{0r} 利用下式来定义:

$$\mathbf{h}_{0r} = \mathbf{h}_0 + \mathbf{M}_0 \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{r}}_0$$

接着,手指的动态特性可用下式来表示:

$$\mathbf{M}_F \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}_F(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{F} \quad (3.75)$$

式中,

$$\mathbf{M}_F = \text{block diag}[\mathbf{M}_{F1} \cdots \mathbf{M}_{Fn}]$$

$$\mathbf{h}_F = [\mathbf{h}_{F1}^T \cdots \mathbf{h}_{Fn}^T]^T$$

$$\mathbf{J}_\theta = \mathbf{H}^T \mathbf{J}$$

式中, $\mathbf{M}_{Fi} \in R^{mi \times mi}$ 及 $\mathbf{h}_{Fi} \in R^{mi}$ 分别为第 i 个广义惯性张量,以及与离心力、哥氏力和重力有关的项。

在对象物运动中存在的约束如下式所示:

$$\mathbf{g}_\theta^T \mathbf{T}(\mathbf{r}_0) \dot{\mathbf{r}}_0 = \mathbf{J}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3.76)$$

其中,

$$\mathbf{g}_\theta = \mathbf{g} \mathbf{H}$$

为了简单起见,设各根手指具有3个自由度,与对象物有摩擦点接触。另外,设手指不存在奇异姿态。这时, \mathbf{J}_θ 为正则矩阵。所以,对式(3.76)进行时间微分,再通过对 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ 求解,得到

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}_\theta^{-1} [\mathbf{g}_\theta^T \mathbf{T} \ddot{\mathbf{r}}_0 + (\dot{\mathbf{g}}_\theta^T \mathbf{T} + \mathbf{g}_\theta^T \dot{\mathbf{T}}) \dot{\mathbf{r}}_0 - \dot{\mathbf{J}}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}}] \quad (3.77)$$

因而,若给定对象物的加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_0$, 则能够唯一决定保持接触的手指关节角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$, 而且可以从式(3.73)中唯一求出在 \mathbf{r}_0 和 $\dot{\mathbf{r}}_0$ 的状态下实现 $\ddot{\mathbf{r}}_0$ 的 \mathbf{t}_0 。下面介绍施加合力和合力矩 \mathbf{t}_0 的指尖接触力。式(3.61)的通解用下式给出:

$$\mathbf{F} = \mathbf{g}_\theta^+ \mathbf{t}_0 + \mathbf{N} \hat{\mathbf{f}} \quad (3.78)$$

式(3.78)右边第二项表示内力。 $\mathbf{N} \in R^{L \times r}$ 为满足 $\mathbf{g}_\theta \mathbf{N} = \mathbf{0}$ 的列全秩矩阵, $\hat{\mathbf{f}} \in R^r$ 为表示 \mathbf{N} 的列方向的内力大小的参数向量。

有了以上的准备工作,手部及对象物系统中手指关节的驱动输入 $\boldsymbol{\tau}$ 、对象物加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_0$ 、内力大小 $\hat{\mathbf{f}}$ 之间的关系式可根据式(3.74)、式(3.75)、式(3.77)及式(3.78)由下式给出:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}_w \mathbf{T} \ddot{\mathbf{r}}_0 + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{N} \hat{\mathbf{f}} + \mathbf{Q} \quad (3.79)$$

其中,

$$\mathbf{M}_w = \mathbf{M}_F \mathbf{J}_\theta^{-1} \mathbf{g}_\theta^T + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{g}_\theta^+ \mathbf{M}_0$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}_F \mathbf{J}_\theta^{-1} [\mathbf{g}_\theta^T \mathbf{T} \ddot{\mathbf{r}}_0 + (\dot{\mathbf{g}}_\theta^T \mathbf{T} + \mathbf{g}_\theta^T \dot{\mathbf{T}}) \dot{\mathbf{r}}_0 - \dot{\mathbf{J}}_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}}] + \mathbf{h}_F + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{g}_\theta^+ \mathbf{h}_{0r}$$

有了以上的准备工作,为了将系统的非线性特性线性化,研究以下的控制律。

[动态控制律]

$$\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{M}_w \mathbf{T} \mathbf{u}_0 + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{N} \mathbf{u}_1 + \mathbf{Q} \quad (3.80)$$

式中, \mathbf{u}_0 及 \mathbf{u}_1 为新的输入。

若将控制律式(3.80)用于手部及对象物系统,采用 $\boldsymbol{\tau}_d$ 作为手指关节驱动输入 $\boldsymbol{\tau}$, 则闭

环系统的特性为

$$\mathbf{M}_w \mathbf{T}(\ddot{\mathbf{r}}_0 - \mathbf{u}_0) + \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{N}(\dot{\mathbf{f}} - \mathbf{u}_1) = 0 \quad (3.81)$$

若 $\text{rank}(\mathbf{G}_\theta) = 6$, 即手指位置满足一般配置条件^[22], 则根据式(3.81)可得下式:

$$\ddot{\mathbf{r}}_0 = \mathbf{u}_0, \quad \dot{\mathbf{f}} = \mathbf{u}_1 \quad (3.82)$$

即利用控制律式(3.80), 系统可以被线性化。下面将说明这一点。

对式(3.81)的两边乘以 $\mathbf{G}_\theta \mathbf{J}_\theta^{-T}$, 由于 $\text{rank}(\mathbf{G}_\theta) = 6$, 故 $\mathbf{G}_\theta \mathbf{G}_\theta^+ = \mathbf{I}_6$, 故得到

$$(\mathbf{G}_\theta \mathbf{J}_\theta^{-T} \mathbf{M}_w \mathbf{J}_\theta^{-1} \mathbf{G}_\theta^T + \mathbf{M}_0) \mathbf{T}(\ddot{\mathbf{r}}_0 - \mathbf{u}_0) + \mathbf{G}_\theta \mathbf{N}(\dot{\mathbf{f}} - \mathbf{u}_1) = 0$$

由于 $\mathbf{G}_\theta \mathbf{N} = 0$, 因此得到 $\ddot{\mathbf{r}}_0 - \mathbf{u}_0 = 0$ 。接着, 将它代入式(3.81)中, 得到 $\dot{\mathbf{f}} - \mathbf{u}_1 = 0$ 。从而, 得到式(3.82)所示的结果。

关于决定新的输入 $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1$ 的方法, 可以采用适当的伺服控制律, 例如采用以下两个式子:

$$\mathbf{u}_0 = \ddot{\mathbf{r}}_{0d} + \mathbf{K}_V(\dot{\mathbf{r}}_{0d} - \dot{\mathbf{r}}_0) + \mathbf{K}_V(\mathbf{r}_{0d} - \mathbf{r}_0)$$

$$\mathbf{u}_1 = \dot{\mathbf{f}}_d + \mathbf{K}_1 \int_0^t (\dot{\mathbf{f}}_d - \dot{\mathbf{f}}) dt$$

根据文献[22]所述, 本方法除了适用于在本手册中一直引用的接触点固定的假定条件以外, 还适用于滚动接触的场合。该文献还讨论了利用滑动接触进行操作的控制律问题。

原田研介

3.9 稳定抓握的力学关系

所谓手部稳定抓握, 是指向对象物施加任意外力干扰时, 抓握系统能够产生适当的恢复力。关于这一问题, 最初是假设用弹性手指进行分析和实验的, 后来演变为设法用软件来改变指尖的刚性, 将各根手指用一个或几个假想弹簧加以置换的问题^[2,31,33], 求出抓握系统的等效刚性, 再通过考察它的正定性来讨论抓握系统的稳定性。本节先通过一个简单的例子来说明摩擦效应对系统稳定性的影响, 然后再介绍考虑摩擦因素的二维稳定抓握模型的构建方法。

3.9.1 摩擦效应对抓握稳定性的影响

为了简单起见, 假设有一个2手指抓握模型, 每根手指用一根假想弹簧代替, 如图3.28所示。现在来介绍将对象物从平衡状态反时针旋转一个微小转角 θ 的情况。若此时没有摩擦, 则弹簧只能沿对象物表面法线方

向产生力的作用, 如图3.28(a)所示, 该力所形成的力偶构成恢复力矩。如果有摩擦存在, 则情况如图3.28(b)所示, 力偶将沿着有助于旋转的方向产生作用。从这个简单的例子可以知道, 有些场合, 即使无摩擦抓握也是稳定的, 一旦考虑了摩擦, 抓握就会变成完全不稳定了。所以, 在实际讨论抓握稳定性问题的时候, 不能忽略指尖与对象物之间的摩擦问题。

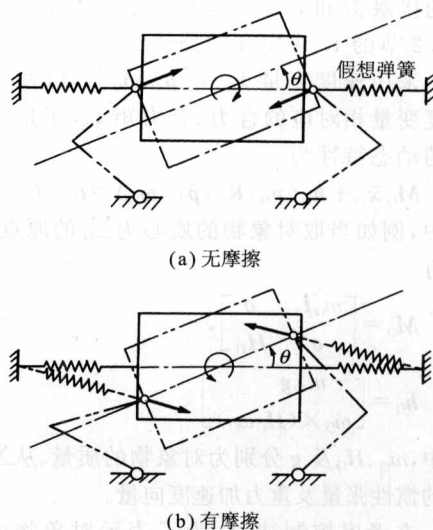


图 3.28 2 指抓握模型

3.9.2 考虑摩擦的二维稳定抓握模型^[33]

图3.29所示为一个供分析用的模型。在该模型中, 每根手指用互相垂直的2根假想弹簧代替。图3.29中假想弹簧 k_{xi} 在平衡状态时处于自然长度, 而假想弹簧 k_{yi} 在平衡状态时被压缩 δ_i 。这个模型的特点在于假想弹簧 k_{yi} 的位置恰好通过柔顺中心。在这种情况下, 若将各个指尖的假想弹簧合成起来, 则对象的刚性矩阵可表示如下:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{x\theta} \\ k_{yx} & k_y & k_{y\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta y} & k_\theta \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

$$k_x = \sum (k_{xi} c_i^2 + k_{yi} s_i^2)$$

$$k_y = \sum (k_{xi} s_i^2 + k_{yi} c_i^2)$$

$$k_\theta = \sum (k_{xi} r_i^2 - k_{yi} \delta_i r_i)$$

$$k_{xy} = k_{yx} = \sum (k_{xi} - k_{yi}) s_i c_i$$

$$k_{x\theta} = k_{\theta x} = -\sum k_{xi} r_i c_i$$

$$k_{y\theta} = k_{\theta y} = -\sum k_{xi} r_i s_i$$

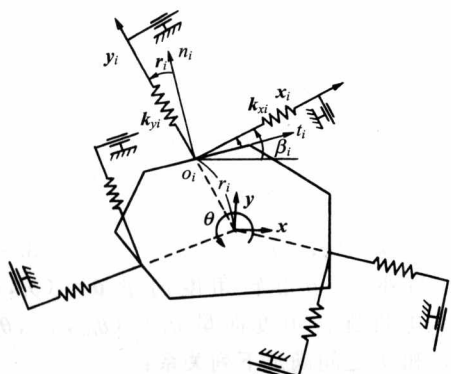


图 3.29 二维稳定抓握的分析模型

为了保证抓握系统的稳定性,刚性矩阵 \mathbf{K} 必须是正定矩阵^[32]。根据 Sylvester 定理^[34],矩阵的正定性是由 \mathbf{K} 的主子行列式 $\det K_i > 0 (i=1, 2, 3)$ 保证的。为了简单起见,假设刚性矩阵 \mathbf{K} 的旋转分量和平移分量互不干涉 ($k_\theta = k_{\theta y} = 0$),则很容易证明: $\det K_1 = k_x > 0, \det K_2 = k_x k_y - (k_{xy})^2 > 0$ 。因此, \mathbf{K} 是正定矩阵,即使抓握系统稳定的充分必要条件为

$$k_\theta = \sum r_i (k_{x_i} r_{i_i} - k_{y_i} \delta_i) > 0 \quad (3.84)$$

由式(3.84)可知,假想弹簧 k_{x_i} 对抓握的稳定性起着极其重要的作用,如果没有假想弹簧 k_{x_i} ,则根据式(3.84)可知 $k_\theta < 0$ 。其结果是,只要有微小的旋转,抓握就立刻变得不稳定。反之, k_{x_i} 的作用使抓握系统具有正旋转的刚性。图 3.16(b)中介绍的 2 指模型就相当于 $k_{x_i} = 0$ 的情况,这个模型对于微小旋转是不稳定的,上面的分析结果很清楚地说明了这一点。

金子真

3.10 机构设计举例

1. ETL 手部^[35]

ETL 手部是一个多手指多关节的手部。众所周知,这是一项具有开创性意义的成果,它出色的机构设计为其后开发的许多手部所采用。图 3.30 分别为 ETL 手部的外形和各个部分的详细结构图。手部自由度的构成是:相当于人手拇指的手指有 3 个自由度,其余的 2 根手指与人的手指一样有 4 个自由度。各个关节通过约 1m 长(根据文献[35]推测)的软管-钢丝绳动力传递系统和带减速器的 2.2W 直流伺服电机驱动,减速器的减速比为

1/94.3。它的每个关节只有一个驱动器,所以预先必须使钢丝绳有足够的初始张力。

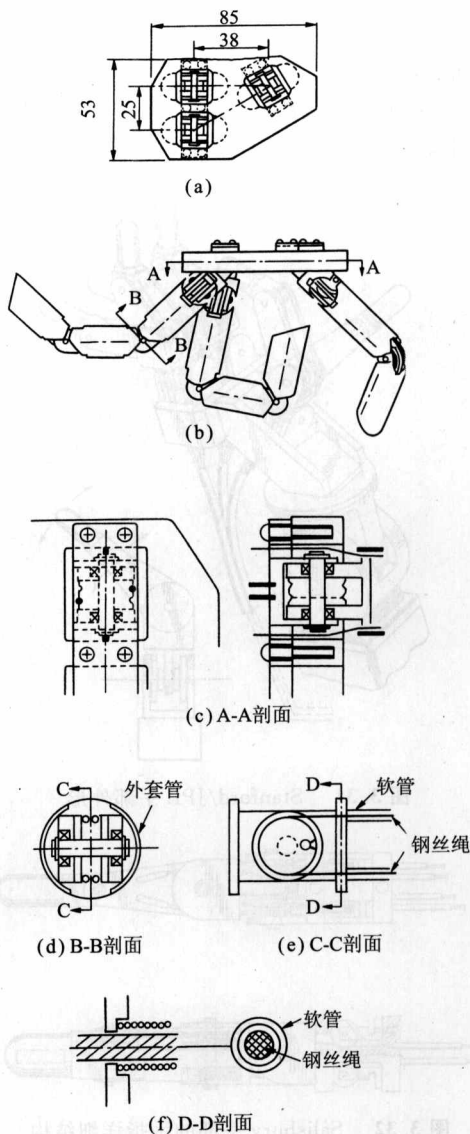


图 3.30 ETL 手部的外观和各部分详细结构

2. Salisbury 手部

图 3.31 和图 3.32 分别为手部总体图和一根手指的外形图。图 3.33 为驱动一根手指的传动系统。手指的特点是每根都有 3 个自由度,但是得用 4 个电机驱动。手腕部分安装有张力传感器,而电机一侧安装有位置传感器,每个电机靠这两个传感器的输出同时实现钢丝绳的张力控制和位置控制。与一个电机控制一个关节的方法相比,虽然电机的数量增加了一个,但它却

没有钢丝绳松弛的忧虑。设由各个关节的转矩 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 和作用于关节 1 轴承上的力 f_b 所构成的向量为 $[\tau, f_b]^T$, 钢丝绳张力向量为 $T = [T_1, T_2, T_3, T_4]^T$, 于是有下面的关系成立:

$$(\tau, f_b)^T = RT \quad (3.85)$$

其中,

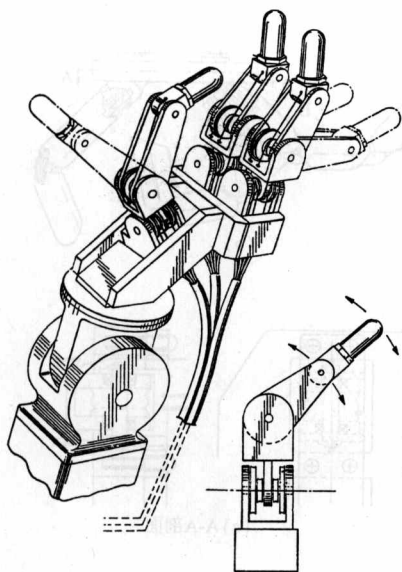


图 3.31 Stanford/JPL 手部外形

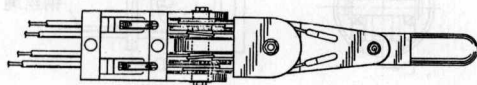


图 3.32 Salisbury 手部的手指详细结构

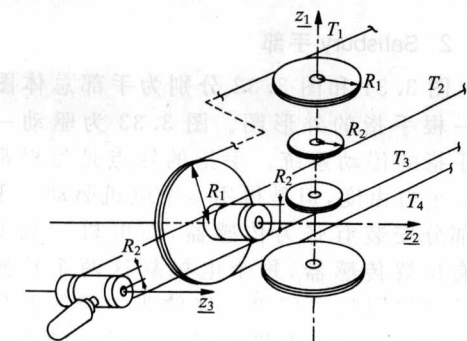


图 3.33 动力传递系统

$$R = \begin{bmatrix} -R_1 & R_2 & R_2 & -R_1 \\ R_1 & R_2 & -R_2 & -R_1 \\ 0 & R_2 & -R_2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

式中, R_1 及 R_2 分别为关节 1、关节 2 处滑轮的半径。由式(3.85)可得出下列关系:

$$T = R^{-1}(\tau, f_b)^T \quad (3.87)$$

另外, 关节旋转角度向量 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ 、电机旋转角度向量 $\theta_m = (\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, \theta_{m4})^T$ 和 T 之间满足下列关系:

$$\theta = A\theta_m + BT \quad (3.88)$$

式中, A 及 B 为由钢丝绳张紧方法和滑轮直径所决定的矩阵。将式(3.88)对时间进行微分, 可求出速度关系, 如下式所示:

$$\dot{\theta} = A\dot{\theta}_m \quad (3.89)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{4R_1} & \frac{R_m}{4R_2} & \frac{R_m}{4R_2} & -\frac{R_m}{4R_1} \\ \frac{R_m}{4R_1} & \frac{R_m}{4R_2} & -\frac{R_m}{4R_2} & -\frac{R_m}{4R_1} \\ 0 & \frac{R_m}{2R_2} & -\frac{R_m}{2R_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{4kR_1} & -\frac{1}{4kR_2} & -\frac{1}{4kR_2} & \frac{1}{4kR_1} \\ -\frac{1}{4kR_1} & -\frac{1}{4kR_2} & \frac{1}{4kR_2} & \frac{1}{4kR_1} \\ 0 & \frac{1}{2kR_2} & \frac{1}{2kR_2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

式中, R_m 为电机滑轮的等效半径; k 为钢丝绳的刚性系数。式(3.88)和式(3.89)是十分重要的计算公式, 靠它们将关节运动和电机运动联系起来。实现这些运动的控制系统如图 3.34 所示。该手部不需要进行很复杂的初始张力的调节, 不过它也有缺点, 就是各个轴的运动之间彼此存在耦合。

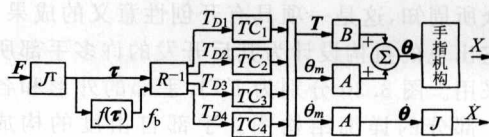


图 3.34 手部的控制系统

3. Utah/M. I. T 手部^[36]

图 3.35 是 Utah/M. I. T Ⅲ型手部的外形图。它是在对速度、强度、动作范围、灵活性、

可靠性、姿态的重复性、成本等各个项目开展详细探讨和前期实验的基础上开发成功的,研究者特别深入地研究了驱动器、位置检测器等各个组成元件,分别开发了适用于手部特点的零部件,从这一点来说,它的设计思想与迄今为止所开发的手部完全不同。它的各根手指都有4个自由度,除了没有小指以外,其结构非常接近于人手的构造。

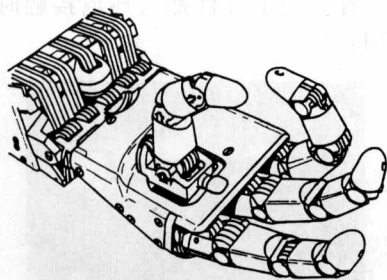
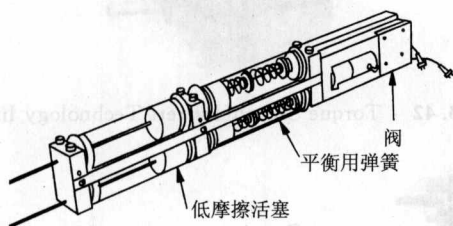
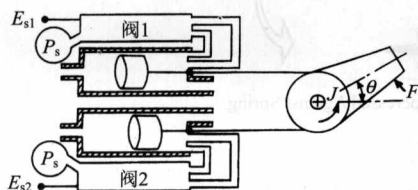


图 3.35 Utah/M. I. T. 手部

图 3.36 给出为驱动手指而开发的压力控制型双重结构气压式驱动器的外形图和原理图。每根手指关节用 2 个驱动器控制。每个驱动器的控制采用力伺服,借助于图 3.37 所示的安装在手腕部分的张力传感器得到输出反馈形成闭环。各根手指关节处安装了专用霍尔元件作为角度传感器(图 3.38)。该传感器的线性度范围为 $0^{\circ} \sim 95^{\circ}$,精度不大于 5%。



(a) 双重结构气压式驱动器外形



(b) 手指关节驱动系统原理图

图 3.36 Utah/M. I. T 手部的驱动器

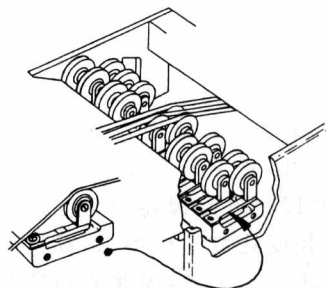


图 3.37 安装在手腕处的张力传感器

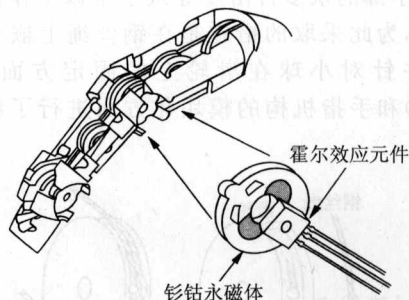


图 3.38 使用霍尔元件的关节角度传感器

开发这个手部不仅为了用于特定作业,还希望能将其作为通用型末端执行器的平台来开展各种实验。

4. WABOT-2 手部^[37]

图 3.39 为早稻田大学拟人型机器人 WABOT-2 附带的手部。WABOT-2 为演奏钢琴而设计,用于进行信息处理。它以人为原型,拇指有 2 个自由度,从食指到小指各有 3 个自由度,5 根手指合计有 14 个自由度。该手部大小几乎与人手相同,达到了高度小型化和高度密集化的程度。各个关节利用安装在机器人本体内部的直流电机驱动,动力通过推挽式钢丝绳和外套管传递至手部。传感器(位置传感器、速度传感器)等不直接装在手背上,而是装在电机一侧。

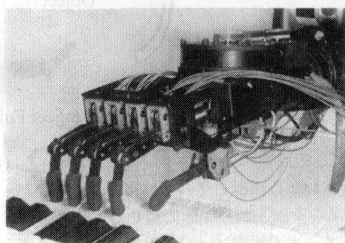


图 3.39 WABOT-2 手部(早稻田大学)

我们知道,这种钢丝绳驱动方式,随着钢丝绳的伸缩或钢丝绳路径的变化,会造成张力的增减,从而引起摩擦力的变化,因此它很难实现对指尖的高精度轨迹控制。不过在 WABOT-2 中,在手指关节处使用了(1:5)的减速器,并以钢丝绳缠卷的角度作为参数建立它的路径变化数学模型,计算指尖运动和电机运动之间的关系,因此能高精度地实现任意指尖运动。

手部的众多自由度导致了维修工作的复杂性,为此采取的措施是在钢丝绳上嵌套小球,并针对小球在滑轮上的固定方面(图 3.40)和手指机构的模块化方面进行了精心设计。

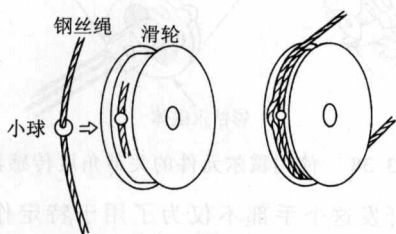


图 3.40 钢丝绳的固定方法

5. E. Barrett Hand

Barrett Hand 是由 Barrett Technology Inc. 开发的手部,于 1999 年开始出售^[38,39]。其特点为质量很轻(1.18kg),而且能够实现高速运动。它由 3 根手指构成,其中 1 根手指有 2 个自由度,其他 2 根手指各有 3 个自由度(图 3.41)。用 4 个无刷电机驱动共计 8 个自由度。就是说,借助于一种特殊的离合器机

构 Torque Switch(图 3.42),一个电机能够控制同一根手指末端的 2 个自由度。图 3.43 给出了 Torque Switch 的动作原理。在图 3.43 中,电机的动力同时传递给手指的末端和根部两根杆件。当末端杆件与环境接触时,电机无法继续旋转,被制动。当根部杆件与环境接触时,由于根部杆件一侧的齿轮与滚珠丝杠连接,电机的旋转仅能够驱动末端杆件。最终,只有当两个杆件都与环境接触时电机才会被制动。

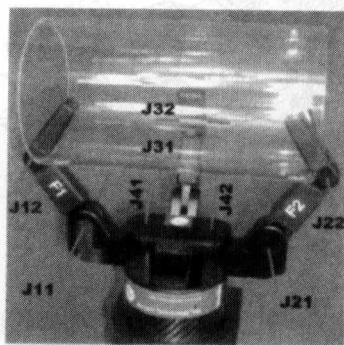


图 3.41 自由度的组成(Barrett Technology Inc.)

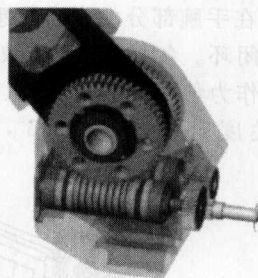


图 3.42 Torque Switch(Barrett Technology Inc)

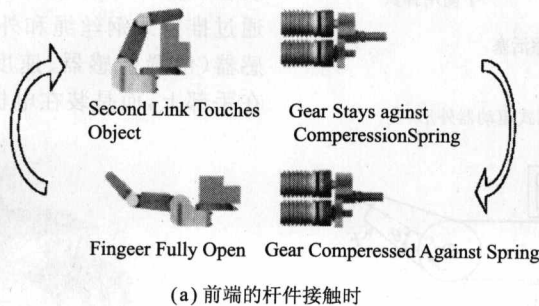


图 3.43 Torque Switch 的动作原理(Barrett Technology Inc.)

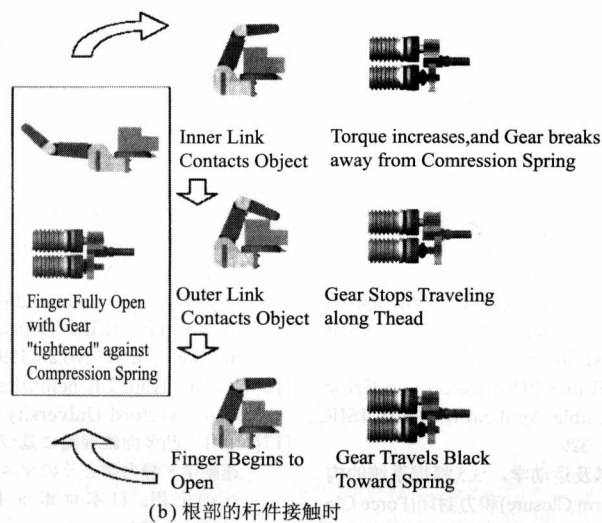


图 3.43 (续)

6. F. DLR-Hand II

图 3.44 所示为 German Aerospace Lab (DLR) 开发的 DLR-Hand II^[40,41]。它的各个手指有 3 个自由度,手掌有 1 个自由度,合计一共为 13 个自由度。手指的根部关节是具有 2 个自由度的结构,装有差动齿轮。手指中间杆件处的关节由根部电机通过皮带供给动力,然后向末端提供 30N 的力输出。另外,在各根手指的末端有 6 个自由度的力/力矩传感器。



图 3.44 DLR-Hand II(DLR)

该手部设计的巧妙之处在于:尽管手部的自由度很多,但手部与外部的连接仅仅用到 12 根电缆。

原田研介 金子 真

参考文献

3.1 手部的分类

- [1] G. Schlesinger: Der Mechanische Aufbau der Kunstlichen Glieder, Ersatzglieder und Arbeitshilfen, Part II, Springer (1919)
- [2] K. Tanie: Design of Robot Hands, Industrial Robots, Mechanism and Machine Theory, Vol.17, No.5 (1982)

3.2 特殊末端执行器

- [1] 杉本旭:特殊ハンド,ロボット工学ハンドブック,コロナ社(1990) pp.298-302
- [2] 日本ロボット工業会:ロボットハンドブック
- [3] 妙徳のホームページ,
<http://www.convum.co.jp/index2.html>
- [4] 加藤一郎編著:図解ロボットハンド,工業調査会(1981) p.89

3.3 机械手部

- [1] G. Schlesinger: Der Mechanische Aufbau der Kunstlichen Glieder, Ersatzglieder und Arbeitshilfen, Part II, Springer (1919)
- [2] F. Y. Chen: Gripping Mechanisms for Industrial Robots, Mechanism and Machine Theory, Vol.17, No.5 (1982)
- [3] K. Tanie: Design of Robot Hands, Industrial Robotics (ed. S. Y. Nof) John Wiley & Sons (1985) pp.112-137
- [4] 杉本旭, 木下源一郎ほか:コンプライアントな機能を持つロボットハンドのハイブリット制御(第3報),第3回日本ロボット学会講演予稿集(1985) pp.319-322
- [5] 日本産業用ロボット工業会,ロボットの標準化に関する調査研究報告者(第IV報)(1982) pp.166-172
- [6] 加藤一郎編著:図解ロボットハンド,工業調査会

- (1981) p.89
- [7] 石橋正一：クラッチ技術読本，小倉クラッチ（1978）pp.58-63
 - [8] 小金井製作所，エアハンドのカタログ（1984）
 - [9] 須藤憲道：生産技術者のための自動組立機設計の手順実例，第25回，第26回，省力と自動化，オーム社（1983）1月号 pp.53-56；2月号 pp.69-72
 - [10] 中村機器エンジニアリング，総合カタログ（1988）
 - [11] マシンエンジニアリング，チャックのカタログ（1988）
 - [12] S. Hirose and Y. Umetani：The Development of Soft Gripper for Versatile Robot Hand, 7th ISIR, Tokyo (1977) pp.353-360
 - [13] G. Bancon and B. Huber：Depression and Grippers with Their Possible Applications, 12th ISIR, Paris (1982) pp.321-329
- 3.4 手指与对象接触的力学及运动学，3.5 抓握系统的构成及分类，3.6 形封闭(Form Closure)和力封闭(Force Closure)，3.7 刚性控制，3.8 动态控制，3.9 稳定抓握的力学关系，3.10 机械设计举例
- [1] M. T. Mason and J. K. Salisbury：Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, The MIT Press (1985)
 - [2] V. D. Nguyen：Constructing Stable Grasps in 3D, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1987) p.234
 - [3] R. M. Murray, Z. X. Li, and S. S. Sastry：A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press (1994)
 - [4] M. R. Cutkosky and I. Kao：Computing and controlling compliance of a robotic hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.5, No. 2 (1989) p.151
 - [5] 張，中村，吉本：不完全な接触をもつ把持の力学的凸多面解析，日本ロボット学会誌，Vol.14, No. 1 (1996) p.105
 - [6] J. Kerr and B. Roth：Analysis of multifingered hands, The Int. J. of Robotics Research, Vol.4, No. 4 (1986) p.3
 - [7] A. B. A. Cole, J. E. Hauser and S. S. Sastry：Kinematics and control of multifingered hands with rolling contact, IEEE Trans on Automatic Control, Vol.34, No.4 (1989) p.398
 - [8] A. B. A. Cole, P. Hsu and S. S. Sastry：Dynamic control of sliding by robot hands for regrasping, IEEE Trans on Robotics and Automation, Vol.8, No.1 (1992) p.42
 - [9] X. Z. Zheng, R. Nakashima and T. Yoshikawa：On dynamic control of finger sliding and object motion in manipulation with multifingered hands, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.5 (2000) p.469
 - [10] D. J. Montana：The Kinematics of contact and grasp, The Int. J. of Robotics Research, Vol.7, No. 3 (1988) p.17
 - [11] N. Sarker, X. Yun and V. Kumar：Control of rolling contacts in two arm manipulation, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.13 (1997) p.374
 - [12] J. C. Trinkle, J. M. Abel and R. P. Paul：Enveloping Frictionless Planar Grasping, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1987)
 - [13] 小俣，永田：多指ハンドにおけるパワーグラスプの力学的解析，日本ロボット学会誌，Vol.13, No.4 (1995) p.525
 - [14] 相山，稲葉，井上：グラスプレス・マニピュレーションの研究：操作形態の分類とピボット操作実現，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.1 (1996) p.114
 - [15] A. Bicchi, C. Melchiorri and D. Balluchi：On the mobility and manipulability of general multiple limb robots, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.11, No.2 (1995) p.215
 - [16] K. H. Hunt：Kinematics Geometry of Mechanisms, Oxford University Press (1978)
 - [17] 平井：凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.1 (1999) p.68
 - [18] 中村：把持とあやつり，計測と制御，Vol.29, No. 3 (1990) p.206
 - [19] F. Reuleaux：Mechanics of Machinery, Dover Press, New York (1875)
 - [20] K. Lakshminarayana：Mechanics of Form Closure, ASME Paper, 78-DET-32 (1978)
 - [21] Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa：Dynamics and stability in coordination of multiple robotic mechanisms, Int. J. of Robotics Research, Vol.8, No.2 (1989) p.44
 - [22] 吉川：把持と操りの基礎理論 1.受動拘束と能動拘束，2.指先力，3.制御，日本ロボット学会誌，Vol.13, No.7 (1995) p.950, Vol.14, No.1 (1996) p.48, Vol. 14, No.4 (1996) p.505
 - [23] V. Nguyen：Constructing force closure grasps, Int. J. of Robotics Research, Vol.7, No.3 (1988) p.3
 - [24] J. Ponce, D. Stam and B. Faverjon：On computing two-finger force closure grasps of curved 2D objects, Int. J. of Robotics Research, Vol.12, No. 3 (1993) p.263
 - [25] J. Ponce and B. Faverjon：On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.11, No.6 (1995) p.868
 - [26] A. Bicchi：On the closure properties of robotic grasping, Int. J. of Robotics Research, Vol.14, No. 4 (1995) p.319
 - [27] J. C. Trinkle：On the stability and instantaneous velocity of grasped frictionless objects, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8, No. 5 (1992) p.560
 - [28] 吉川，永井：多指ハンドの操り力と握力，計測自動制御学会論文集，Vol.23, No.11 (1987) p.90
 - [29] S.-F. Chen and I. Kao：Theory of Stiffness Control in Robotics Using the Conservative Congruence Transformation, Robotics Research, the Ninth Int. Symp. (1999) p.9
 - [30] 吉川：ロボット制御基礎論，コロナ社 (1992)
 - [31] B. S. Baker et al.：Stable Prehension with a

- Multifingered Hand, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1985) p.570
- [32] V. D. Nguyen : The Synthesis of Stable Grasps in the Plane, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1986) p.234
- [33] M. Kaneko et al. : Basic Considerations on the Development of a Multi-fingered Robot Hand with the Capability of Compliance Control, Proc. of Advances in Robot Kinematics (1988) p.46
- [34] 児玉ほか : システム制御のためのマトリクス理論, SICE 編 (1978) p.269
- [35] T. Okada : Object-handling system for manual industry, IEEE Trans. Sys., Man., and Cybern. Vol. SMC 9-2 (1979) p.79
- [36] S. C. Jacobsen et al. : Design af the Utah/M.I.T. Dexterous Hand, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco (1986) p.1620
- [37] 菅野重樹ほか : 情報処理作業を目的とした自律ロボットの4肢システムの構造, 日本ロボット学会誌, Vol.3 No.4 (1985) pp.81-95
- [38] MCB-Industrial Robot Feature Article The Barrett IIand Grasper-programmably flexible part handling and assembly, Industrial Robot : An International Journal, Vol.27, No.3 (2000) pp.181-188
- [39] <http://www.barrett.com/robot/>
- [40] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger : DLR-Hand II : Next Generation of a Dextrous Robot Hand, Proc. of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2001) pp.21-26
- [41] <http://www.robotic.dlr.de/>

第4章 移动机构

移动机器人的研究大体上可以分为关于移动机构组成要素和系统的研究、关于自律移动的研究以及关于移动机器人应用的研究等方面。不过,这几个方面彼此不是独立的,例如,开展自律移动研究时,组成研究平台的移动机构的特性对于构筑系统的难易程度将会产生影响。因此,在机器人应用研究的领域中,有关移动机器人的机构及其控制的研究应该说也是不可缺少的。

本章对车轮式移动式机构和它的派生机构——履带式移动机构、腿脚式移动机构以及它们的各种组合式(或称混合式)移动机构,包括三维空间中运动的水中机器人和空中机器人进行说明。

4.1 车轮式移动机构

车轮式移动机构在地表面等移动环境中控制车轮的滚动运动,使移动体本体相对于移动面产生相对运动。该机构的特征在于,在平坦的移动环境下,它比履带式移动机构或腿脚式移动机构行进的速度和效率都更高,它的机械结构也比较简单,控制性能好。

车轮的历史可以说是从滚轮开始的。随后出现了铁路和汽车,为了解决这些交通工具所面临的各种问题,研究开发,并得到不断发展。该领域研究的特点是通过实验上升到理论,再从不断寻求理论根据的实践活动中加以积累。迄今为止,车轮式移动机构被应用在各种各样的领域中,在移动机器人中也占有一席之地。根据这样的视角,在4.1.1节中,本书超出移动机器人的范围,对各种车轮式移动机构作了介绍,讲述它们与机器人工程的相关内容。后续的小节则针对本章介绍的移动机构的原理,从理论上进行了分析,同时也照顾到内容的全面性和系统性。

车轮式移动机构由车体、车轮、处于车体和车轮之间的支撑机构组成。它们组合起来就能形成各种各样的机构。在4.1.2节中,

重点涉及与移动机器人领域有关的各种车轮及其支撑机构。

对于车轮式移动机构中的车轮及其支撑机构,必须进行正确的配置,以便移动面与车轮之间在机构上保持合理接触。在4.1.3节中,我们从机构学的观点上对它作了说明。

一般机构仅根据机构学的观点就能够决定位置和姿态,而车轮式移动机构则不然,运动学将在其中起到重要的作用。在4.1.4节中,以引入移动机器人的典型车轮式移动机构为对象讲解运动学问题。

以往对车轮式移动机构的运动学研究多数是以汽车为中心展开的,事实上移动机器人所涉及的、与汽车车轮配置不同的移动机构的运动力学问题迄今很少有人问津。4.1.5节以静力学为中心进行了说明,内容既涉及与汽车具有共性的部分,也涉及车轮式移动机构在低速移动条件下产生的各种运动阻力问题。

对小型、低速移动机器人进行动力学分析的必要性不大,但随着向大型化、高速化的发展,对移动机器人的控制性和安全性要求越来越严,因此动力学分析是不可缺少的。4.1.6节讲解了有关这方面的基本分析方法。

在4.1.7节涉及车轮式移动机构基本系统的组成、车轮和转向的基本控制方法,然后讲述导向和进行位置估计的方法。

4.1.1 各种车轮式移动机构

将车轮作为移动机构的装置有很多,例如铁路机车、汽车、自行车、轮椅等,它们在我们的生活中都不可或缺。在工业领域中,车轮式移动机构被广泛地应用于农业机械、建筑机械、铲车、搬运机械(如工厂中的无人搬运车),它们大大地提高了生产效率。1997年发射的火星表面探查器甚至使用了一种NASA设计的6轮移动车——火星漫游者(Rover)^[1]。

在本节中,以汽车为例,对于在各种领域中使用的车轮式移动机构作简要的说明。

1. 汽车

在《日本道路交通法》的第二条第9项中,汽车的定义是:“使用原动机而不依靠轨道或架设线缆运行的车辆,但是自行车、带原动机的自行车、残疾人用轮椅、步行辅助车等按照法令规定属于其他小型车的车辆(以下称为“代步辅助车等”)不属此列。”可见,汽车定义的范围很广泛。

关于对汽车的研究开发,主要涉及高速移动、安全、环境保护,甚至包括智能道路交通系统(ITS: Intelligent Transport Systems),范围极其广泛。从20世纪50年代开始,人们着手研究“汽车自动驾驶系统”,其目的在于使汽车安全地移动至指定的场所,随着计算机技术的提高和普及,这项技术得到了长足的发展。为了实现自动驾驶,它必须有下面两种功能:①道路检测和沿道路的行驶控制;②障碍物检测和回避,这些功能与移动机器人有共同点^[2]。

2. 工业车辆

按照日本工业车辆协会的统计,工业车辆分为带动力的搬运车(蓄电池搬运车(包含托板搬运车)、内燃机搬运车、无人搬运车、铲车(蓄电池式、内燃机式)、汽车挖掘机、厂内作业车)等以及无动力的搬运车(手推车、起重车)等。相关的标准涉及ISO3691(关于工业车辆的安全标准)等。

无人搬运车(AGV: Automatic Guided Vehicle)在《无人搬运车系统——术语》(JIS D 6801)中,根据转向方式,分为如图4.1所示的前轮转向方式、双轮差速方式、独立转向方式三种。除此以外,还有一种形式与独立转向方式类似,称为前后独立转向方式^[3],它将两个前轮及两个后轮分别进行机械耦合,结果它们能同时控制转向。

在《无人搬运车——设计通则》(JIS D 6803)中,对路面设置明确规定了4项要求,包括起伏(基准范围的最高高度与最低高度之差)、路面坡度、台阶高度、沟槽宽度等(图4.2)。在一些应用场合,车轮形移动机器人的移动机构具有与无人搬运车相同的结构,因此在设计时也有必要依据同样的条件对其加以考虑。

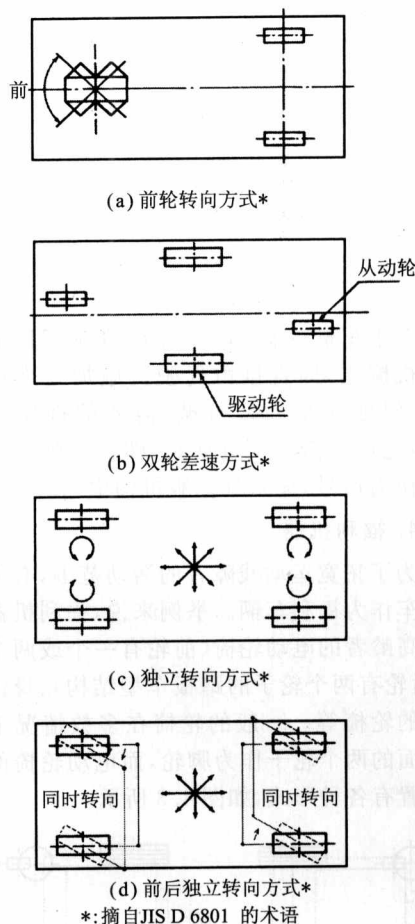


图4.1 AGV的转向方式

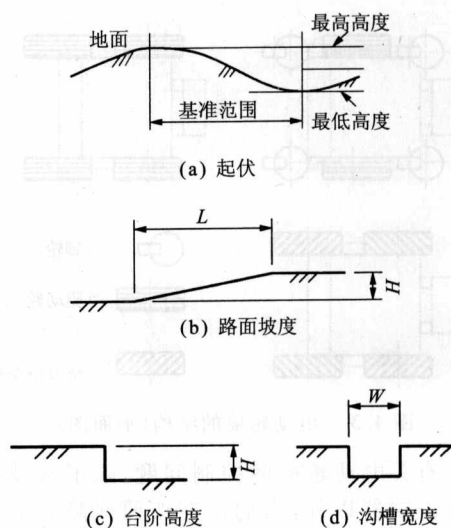


图4.2 移动面的状况(《无人搬运车——设计通则》(JIS D 6803))

3. 建筑机械及农业机械等特殊车辆

在农业和土木建筑领域中,要求机械能在柔软地基或不平整的地面上移动,或者在移动中同时进行耕作或挖掘等作业。在这样的条件下,移动系统必须能够发挥足够的牵引力。为了更好地解决这样的问题,人们正在开展有关土质与机械相互作用的研究,即所谓的土质机械学(terramechanics)领域的研究^[4]。

至于车辆的控制,在多数情况下目前都采用机械式,即直接由驾驶员施加力来进行操作,但如果是大型机械,需要的操作力很大,因此可以借助于电动式,即将驾驶员的操作变换为信号,输入到伺服机构中^[5]。

4. 福利机器

为了拓宽运动残障者的活动范围,有人利用汽车作为福利车辆。举例来说,福利机器有面向高龄者的电动轮椅(前轮有一个或两个轮子,后轮有两个轮子的踏板车型结构)、身体残障者的轮椅等。一般的轮椅在多数情况下都将前面的两个轮子作为脚轮,而电动轮椅的车轮配置有各种形式,如图 4.3 所示。

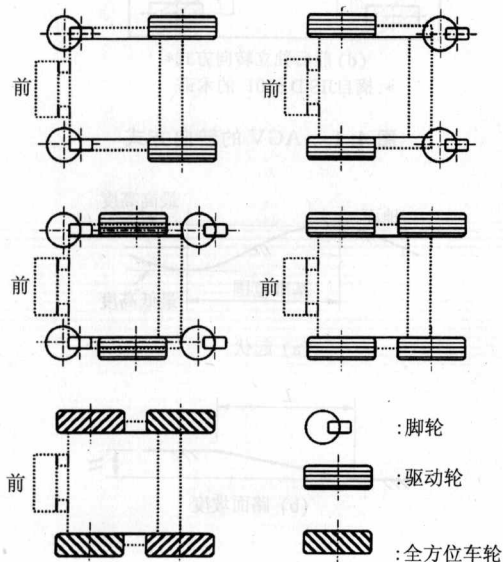


图 4.3 电动轮椅的结构(平面图)

有关电动轮椅的控制问题,除了涉及操纵杆控制器以外,人们正在按照残障者的需要开展对各种接口装置的研究和实用化开发。为了能够适应阶梯等移动环境,还在开展相应机构的研究和开发^[6,7]。

5. 教育、研究、开发的车轮式移动机构

在自律移动机器人、微型鼠等有关移动算法研究的平台中,广泛通过左右车轮的速度控制实现移动,此即所谓的双轮独立驱动方式(PWS: Powered Wheel Steering,它与 AGV 的双轮差速驱动方式意义相同)的车轮式移动机构^[8]。此外,全方位移动车也被用来作为一种有关移动算法研究的平台^[9](图 4.4)。

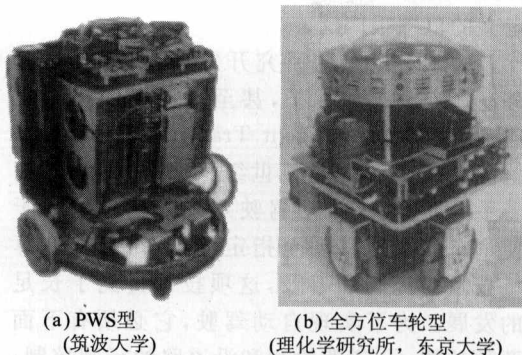
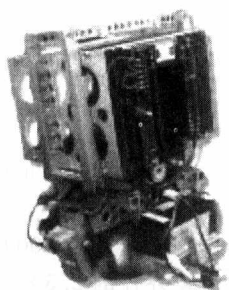


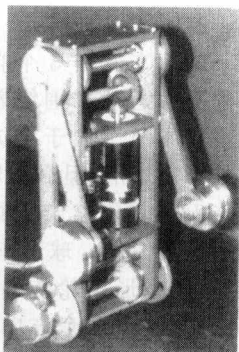
图 4.4 自律移动研究平台举例^[8,9]

除了涉及车轮式移动机构本身的结构以外,车轮式移动机构的研究还常常借助于单轮式或双轮式移动机构来研究直立稳定移动的控制问题。例如,有人在单轮机构上利用陀螺效应研究不平整地面或倾斜地面移动及旋转的问题^[10],有人是针对如图 4.5 所示的鼓形车轮机器人,研究既能保持前后方向的直立稳定性,又能沿规定路径移动的控制问题等^[11]。对于两轮机构,有人针对如图 4.6 所示的同轴双轮车,进行姿态控制研究^[12],而如图 4.7 所示的双轮车与双轮汽车具有同样的车轮配置,人们在它上面搭载陀螺和电机,以便借助于陀螺效应来研究车体的稳定性问题^[13]。美国在 2001 年公布了站立式踏板车,它的结构与上面的同轴双轮车无异。

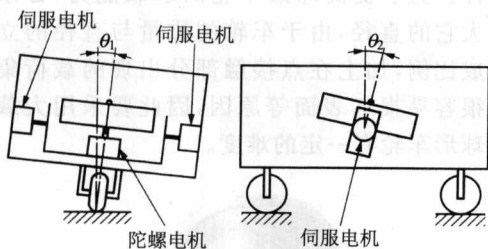
至于三轮及三轮以上的车轮式移动机构,也有各种研究成果,例如,有关不平整地面及阶梯等特殊环境下的移动机构和车轮本身的研究,有关推进机构的研究,以及完整全方位移动机构的研究等。其中,包括后面将要涉及的手臂转动式阶梯升降机器人^[14]以及在 4.2 节介绍的带转向的四履带方式移动机构,应该指出它们是属于车轮与其他机构组合的结果。

图 4.5 鼓形车轮单轮机器人^[11](筑波大学)

(a) 1号机



(b) 3号机(双臂型)

图 4.6 同轴双轮车^[12](电气通信大学)图 4.7 陀螺双轮车^[13]

在本节中,以“连续保持车轮与移动面接触,而且同时将旋转变换为移动推进力的机构”作为重点加以说明。

4.1.2 车轮式移动机构的构成要素

车轮式移动机构如图 4.8 所示,它由车体、车轮、车轮-车体之间将两者结合起来的支撑机构、车轮驱动机构等组成。车轮式移动机构可以按照车轮数、转向机构、车轮配置方式等进行分类。至于与车轮配置有关的转向机构与驱动轮、从动轮的组合问题,我们放到机构学中去研究。

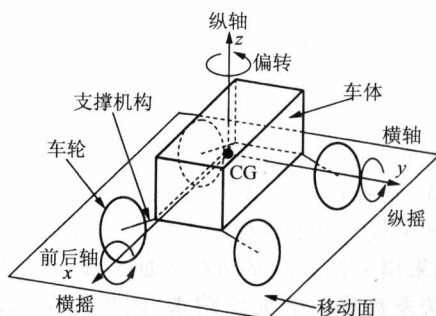


图 4.8 车轮式移动机构的基本构成(以 4 轮为例)

以下将叙述各部分的功能等内容。

1. 车 体

车体是车轮支撑机构的安装基座,起着在机械上决定各个车轮的位置关系的作用。另外,它在移动面与各车轮、车轮支撑部分之间起到驱动力和制动力等的力传递作用。在实施移动控制时,多数情况下需要将车体上的特定位置定义为基准点。当然,车体有时也充当安装搭载机械手等的基座。

2. 车 轮

通过车轮式移动机构,车轮与车体实现机械耦合,共同支撑车辆的质量,同时利用它相对于移动面的自由度,起到改变车体相对位置的作用。车轮还能对移动带来的冲击产生缓冲作用,或利用自身的变形降低接触地面的压强,或借助于轮胎面的图纹取得防滑效果。总之,车轮的关键问题在于选定材料、表面形状和结构上。有人对复合结构车轮展开研究^[15],它往往能起到主动解决上述问题的作用。

按照有无推进力产生功能,车轮又可以分为驱动轮、从动轮两大类。有些车轮,即使车轴上不安装驱动装置,也能产生车轮的推进力,因此这种分类只是功能上的分类而已。

根据单个车轮的自由度,车轮可以划分为圆板形的一般车轮、球形车轮、合成型全方位车轮等几类。车轮与移动面之间的接触区分为滑动接触、滚动接触两种。车轮的功能是两者同时并存。

1) 车轮(圆板形)

图 4.9 所示的圆板形车轮与移动面以滚动的形式接触和运动,在多数情况下,它有 2

个运动自由度,即沿车轮转轴垂直方向的平移运动和以着地点为中心的旋转运动,个别情况也可以按照3个自由度来进行处理,即再加上图4.9中车轮的倾斜(侧斜)。

车轮式移动机构用平面上的位置 (x, y) 和姿态 θ 表示。但是,如同汽车转向的换向操作那样,圆板形车轮式移动机构无法独立控制这3个量。对于这样的3个自由度位置坐标,如果用来控制的驱动器数量不够,这样的约束关系被称为非完整约束,圆板形车轮便具有这样的特征^[16]。

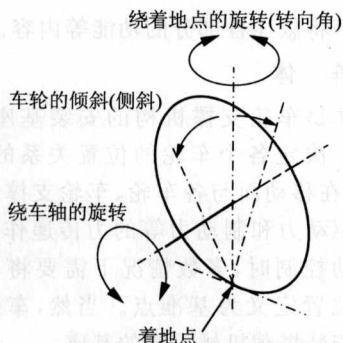


图 4.9 车轮(圆板形)的自由度

通常,车轮式移动机构都选用现成的车轮产品。日本国家工业标准《工业用车轮》(JIS B 8922-1999)中规定,工业用车轮适用于手推车、箱板搬运车、厂区内搬运车和其他工业用搬运设备移动所需要的车轮。其中,按照车轮的形状、轴承、车轮本体材料、轮胎材料等对轮胎进行分类。车轮的承载能力与外径、轮圈宽度等存在正相关的关系。在同一个 JIS 的附录“无动力车辆的工业用车轮——尺寸和标称载荷”中,对有关车轮的标称载荷条件有如下的规定:选择车轮的标称载荷应该大于施加在车轮上的总载荷(包含车辆自重在内)的 1.25 倍。

滑动率 s 用式(4.1)定义。若刚体车轮与刚体平面之间无滑动,则车轮的移动量等于车轮直径与旋转角度之积。但是由于车轮总会产生微小变形等原因,即便车轮与移动面之间无滑动,实际移动量也不会为零。

$$s = \frac{|v_w - v|}{a} \quad (4.1)$$

式中, v_w 为轮胎的圆周速度; v 为车速; a 为轮胎的圆周速度或车速彼此之间的较小者。

◎ 行驶速度为 4km/h(最高速度限制为 25km/h)

◎ 使用温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$

◎ 行走表面为硬质平面,有障碍物,但其高度限制为

- 柔软轮胎(肖氏硬度 $A \leq 90$)的车轮时,不得超过车轮外径的 5%
- 硬质轮胎(肖氏硬度 $A > 90$)的车轮时,不得超过车轮外径的 2.5%

(肖氏硬度请参阅 JIS K 6253)

2) 球形车轮

球形车轮有 3 个自由度,即平面两个方向的平移运动和围绕着地点的旋转,因此可以说它本质上属于全方位车轮。不过,即使其外形呈球形,但靠车轴来支撑车轮,那么从功能上讲其仍然属于圆板形车轮之列,不能算是球形车轮。球形车轮能构成完整的移动机构,向球形车轮传递驱动力的机构形式很多,不过实现两个方向平移运动的机构比起圆板车轮来说要复杂得多^[17]。

图 4.10 所示的球形车轮通常作为从动轮,对移动施加的阻力是全方位的,不像脚轮那样。为了提高球形车轮的承载能力,必须增大它的直径,由于车轮的质量与直径的立方成比例,加上在点接触部分出现的载荷集中很容易损坏表面等原因,因此要采用大载荷球形车轮有一定的难度。

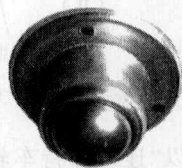


图 4.10 球形车轮

3) 合成型全方位车轮

这类车轮的结构与车轮的配置有密切的关系。因此,这里针对车轮和车轮式移动机构一并加以介绍。

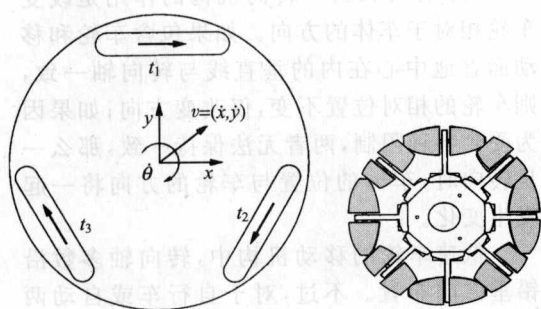
圆板形车轮沿着车轴平行方向的平移运动受到摩擦力的约束。与此不同的是,如果在轮毂外周配置小直径滚子组装成全方位车轮,靠滚子滚动接触的组合,能得到 3 个自由

度,因此它属于完整的移动机构。图 4.11 给出斯坦福全方位车轮^[18]、万向车轮^[19]、Mechanum 车轮^[20]、Vuton 履带^[21]以及 Vuton2^[22]等设计实例,虽然它们彼此在位置关系(如滚子与轮毂所成角度等),以及相当于轮毂的机械部分结构等方面均存在区别,但它们的基本原理相同,因此在本小节中将它们统称为“合成型全方位车轮”。

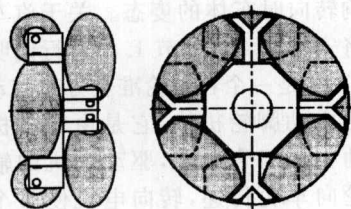
斯坦福全方位车轮的车轮外形接近正圆形,在轮毂周围配置多个鼓形滚子。如图 4.11 所示,万向车轮有两个沿轮毂外周配置的滚子,而滚子的支撑部分彼此错开一定角

度,使得彼此互有重叠,它已被用于图 4.4 的研究平台。Mechanum 车轮的滚子在轮毂周围相对于车轴倾斜配置,使车轮外周更接近于圆形,使其所承受的载荷得到提高。Vuton 履带结构在两串链条之间安装滚子隔圈,其内安装圆柱滚子。Vuton2 则有 4 组车轮模块,由平行连杆机构构成,使小车轮始终保持相同方向,通过各车轮模块旋转驱动的组合实现全方位移动。

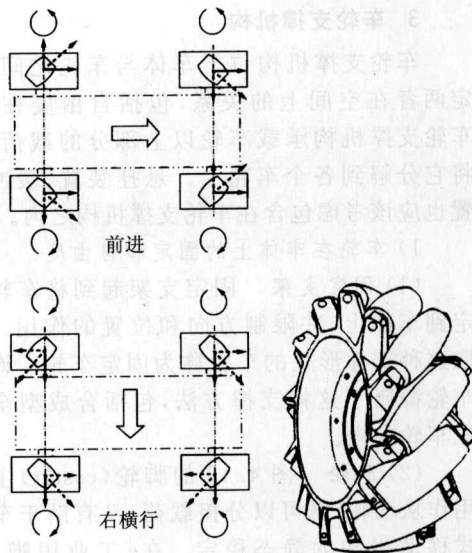
在合成型全方位车轮的车轮式移动机构中,各个车轮的滚子(或小车轮)必须配置在限制其他车轮的滚子(或小车轮)自由旋转的



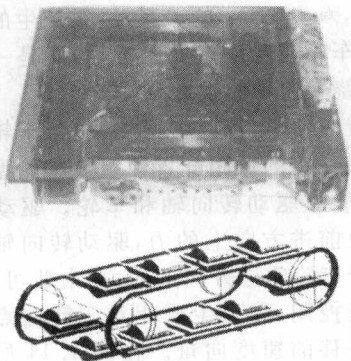
(a) 斯坦福全方位车轮^[18]



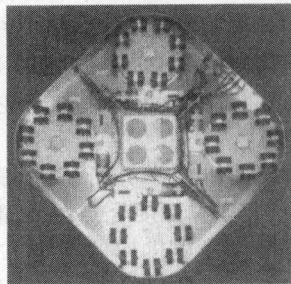
(b) 万向车轮^[19]



(c) Mechanum 车轮和移动方法^[20]



(d) Vuton 的移动机构^[21](东京工业大学)



(e) Vuton2 的移动机构^[22](东京工业大学)

图 4.11 合成型全方位车轮举例

方向上。因此,车轮数必须是3个或3个以上。不过,这样的车轮在空间上很难设置直接驱动及制动触及移动面的滚子的机构。由于与移动面接触的车轮的直径较小,车轮承载力是有限的,实际上,是由轮毂周边的滚子起到承载的作用。另外,车轮的承载力还受到滚子等的支撑轴强度的限制。总之,与相同直径的圆板形车轮相比,合成型全方位车轮的允许载荷比较低。相反,由于移动方向与滚子旋转方向之间的夹角大,引发额外的移动阻力,因此合成型全方位车轮所耗费的驱动力比圆板形车轮的大,详细内容安排在力学一节中进行叙述。

3. 车轮支撑机构

车轮支撑机构位于车体与车轮之间,决定两者在空间上的关系,包括自由度在内。车轮支撑机构承载车轮以上部分的载荷,并将它分解到各个车轮上。悬挂装置、缓冲装置也应该考虑包含在车轮支撑机构之内。

1) 车轮在车体上的固定和自由度

(1) 固定支架 固定支架起到将车轮固定到车体上,并限制方向和位置的作用。采取这种支撑形式的车轮称为固定车轮。许多车轮都属于这样支撑方法,包括合成型全方位车轮在内。

(2) 脚轮 图4.12的脚轮(caster)主要用作从动轮,既可以分担载荷,又有助于车轮式移动机构的静态稳定。在《工业用脚轮》(JIS B 8923)中,脚轮被分类和定义为两种:一种是转动脚轮,主要由顶板、轮叉、转动部分、车轮和车轴组成,转动部分能自由转动,车轮进行旋转;另一种是固定脚轮,主要由顶板、轮叉、车轮和车轴组成,不能转动,仅车轮进行转动。值得指出的是,定义中虽然包含了上面的固定支架,但是脚轮的英文原意是指安装在旋转体(swivel)上的车轮,因此在用法上要注意。

如后面的机构学分析所述,脚轮相当于在移动面与车体的接合点处设置了一根连杆。若脚轮与移动机构的前进方向是反向,而它的轮叉方向将与前进方向呈现近似垂直的话,会产生很大的阻力,甚至有时会对移动机构的路径控制产生影响。有些市售脚的转

动的转动部分有较大的间隙,目的就是为了减少这种影响。

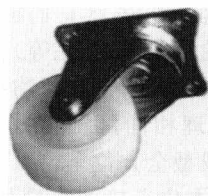


图 4.12 脚轮

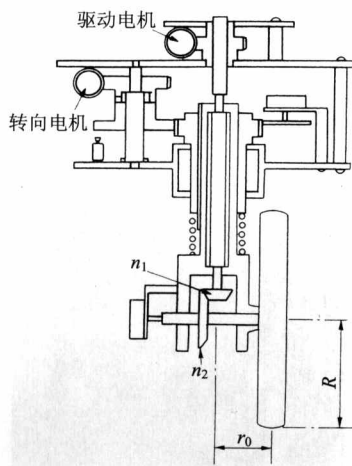
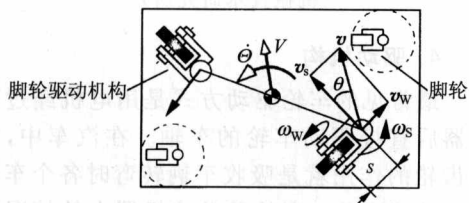
上面提及的球形车轮和转动脚轮在功能上都可以归类于“万向轮”。

(3) 转向机构 转向机构的作用是改变车轮相对于车体的方向。如果包含车轮和移动面着地中心在内的垂直线与转向轴一致,则车轮的相对位置不变,仅改变方向;如果因为受到各种限制,两者无法保持一致,那么一旦转向时,车体的位置与车轮的方向将一起发生变化。

低速车轮的移动机构中,转向轴多数沿铅垂方向布置。不过,对于自行车或自动两轮车等来说,为了提高前进中的稳定性,转向轴与移动面之间保持一定的后倾角。该后倾角将影响转向时车体的姿态。关于汽车的转向问题将安排在4.1.3节1.中进行说明。

图4.13是一个在4轮准全方位移动机构中采用的主动脚轮机构,它是由转向机构和车轮驱动机构组合而成,驱动电机的输出通过伞齿轮向车轮传递,转向电机使整个车轮机构旋转,调节车轮本身的姿态。设伞齿轮的齿数 n_1 和 n_2 、偏距 r_0 、以及车轮半径 R 之间存在 $n_1/n_2=R/r_0$ 的关系,结果产生的一个特点是:车轮在着地点处无滑动,而是一面滚动,一面绕转向轴的投影点旋转^[23]。

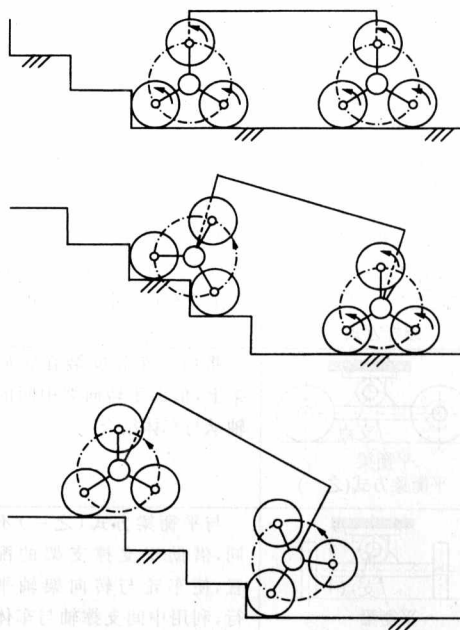
让转向轴(与转动脚轮类似)与车轮的滚动方向成一定的偏距配置便组成脚轮型驱动轮机构,能够驱动转向轴和车轮。驱动车轮产生车轮前进方向上的力,驱动转向轴则产生垂直于车轮前进方向上的力,由此可知,对各轴实施控制,即可生成相对于转向点沿任意方向平移的速度向量。在图4.14所示的完整全方位移动车结构中,配置了两组脚轮型驱动车轮,以及两个稳定用的转动脚轮^[24]。

图 4.13 主动脚轮^[23]图 4.14 脚轮型驱动机构的全方位移动车^[24](富士电机)

(4) 带自由度的车轮支臂 还有一种移动机构,除了具有转向功能外,还带有能起到调整车轮位置和方向的机构。臂旋转式阶梯攀爬机器人^[14]带有4组特殊形状的车轮,它们将3个小车轮配置成三叶草形状。驱动位于臂前端的车轮在平面上移动,靠左右车轮的速度差造成车轮与移动面之间的滑动,可以调整前进的方向。攀爬阶梯时需要支臂配合旋转,使车轮恰好旋转在脚踏层上(图4.15)。带关节型臂的移动机构将安排在4.5.1节中加以说明。

2) 缓冲和悬挂机构

如果移动面有小的凹凸起伏不平,就往往

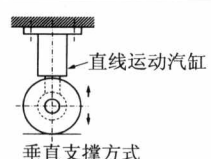
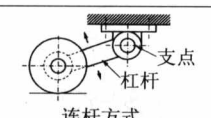
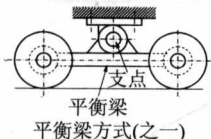

图 4.15 臂转动式阶梯上下机器人^[14]

要求车体具有减振功能。此外,对于4轮以上的车轮式移动机构而言,如果希望在不平整的地面上或机械强度低的松软地面上实现稳定的移动,保持车轮随时着地是不可缺少的。

为此,加大轮胎本身的变形量是一种解决的途径。但是轮胎变形毕竟受到一定限制,同时会带来移动阻力增大的负面影响。因此,在多数情况下,都是将缓冲装置(吸收振动、冲击)和悬挂装置(保证车轮着地)组合起来应用。悬挂装置可以分为被动式机构和主动式机构两种。被动式机构的应用最广泛,如表4.1给出各种被动式悬挂机构。在表4.1中列出的连杆方式和平衡梁方式中,所标明的连杆方式均是指平行四边形连杆机构。

图4.16中的NASA漫游者火星探查机器人(Rover Sojourner)采用的是所谓的摇臂转向架悬挂机构。Rover用平衡梁将两个前进车轮耦合起来,再用平衡梁耦合该杆与后车轮。如果左右移动地面出现凹凸差,则空间连杆机构能够保证6个轮子始终着地。前轮与中轮平衡梁的支撑点被设计在靠近中轮附近处,其目的在于减轻施加于前轮的载荷,增强翻越障碍物的爬坡能力^[1]。

表 4.1 车轮均匀着地的机构

形 式	说 明
 <p>垂直支撑方式</p>	<p>固定于车体的汽缸的前端安装车轮,借助于汽缸的伸缩跟踪地面的凹凸起伏。由于汽缸直接承受弯曲应力,如果应力过大,应注意选定适于受力的汽缸</p>
 <p>连杆方式</p>	<p>车轮与车体之间借助于连杆方式定位,另有缓冲装置承受载荷(图中未示出)</p>
 <p>平衡梁 平衡梁方式(之一)</p>	<p>将两个车轮安装在转向架上,借助于转向架中间的轴承与车体结合</p>
 <p>平衡梁 平衡梁方式(之二)</p>	<p>与平衡梁方式(之一)不同,借助于支撑支架的配置,使车轮与转向架轴平行,利用中间支撑轴与车体结合使载荷分散</p>

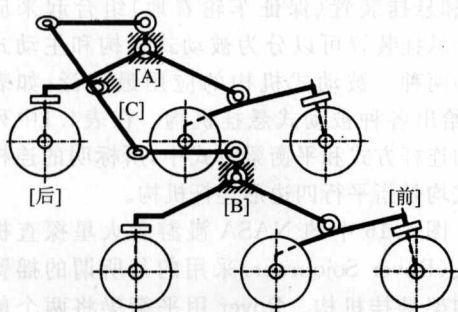
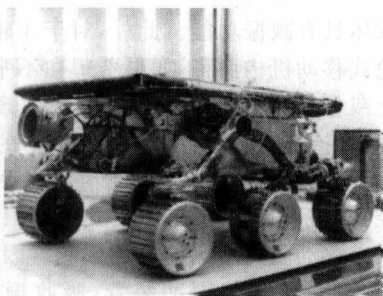
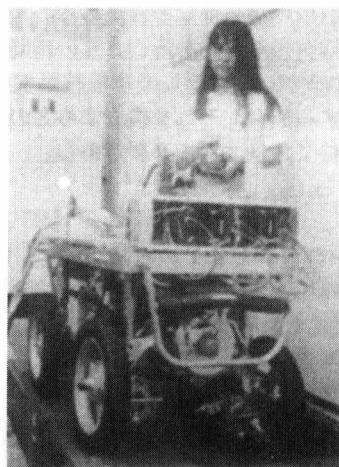


图 4.16 火星漫游者 Rover Sojourner (NASA/JPL) 的悬挂机构

图 4.17 属于主动悬挂四轮移动机构,其特点是对悬挂机构主动实施姿态控制。具体就是借助于直流电机驱动悬挂装置的连杆机构,通过改变悬挂装置的长度达到减少姿态变化的目的^[25]

图 4.17 主动悬挂四轮移动机构^[25]
(机械技术研究所)

4. 驱动机构

最常见的车轮驱动方式是用电机经过减速器后直接驱动车轮的车轴。在汽车中,差动齿轮的作用就是吸收车辆转弯时各个车轮之间的速度差。车轮移动式机器人的情况则不然,在多数场合中都是每个车轮有各自的驱动装置,对它们分别进行速度控制。

实际上与移动面接触的车轮,即使它本身不直接被驱动旋转,也是能够产生驱动力的。它的例子可以举出前述的利用合成型全方位车轮的车轮式移动机构,还有摆线移动车(多个脚轮沿规定方向安装在圆板上进行公转运动,移动的方向则与施加在脚轮上的合力方向一致^[26]),以及脚轮混合型四足步行机器人“Roller-Walker”^[27]等车轮移动方式。

4.1.3 机 构

单独来看,车轮式移动机构属于不完全的机构,只有当车轮与移动面接触之后它才开始起作为机构的功能,此时允许从机构学的角度来分析它的动作,如同人们对其他机械做的一样。在本节中,首先从机构学的观点理解车轮式移动机构,然后对转向机构和驱动机构进行说明。车轮式移动机构不能像其他机构那样从机构学的观点来决定位置姿势,因此在 4.1.4 节中我们将换成从运动学的角度来对其加以分析。

1. 机构学

1) 车轮

当车轮与水平移动面发生滚动接触时,两个接触点 P 是没有相对运动的点,即瞬心。接触点在移动面上移动,所以固定中心的轨迹是一条直线(图 4.18)。

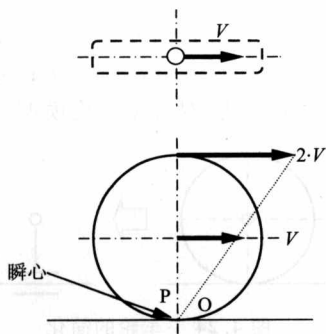


图 4.18 滚动接触的瞬心

假定车轮与移动面属于刚体,发生滚动接触,那么车轮的旋转和旋转引起的车轮的平移运动是一起完成的,而且车轮的前进方向与旋转中心轴垂直。

2) 等效两轮模型

移动体在平面运动副约束下的位置、姿态可以由该移动体上的两个不同的点来决定。要分析汽车的运动,可以如图 4.19 所示将汽车简化为等效两轮车模型来处理,不过对于其他车轮式移动机构来说,应该改换成描述运动所必需的最小车轮数。

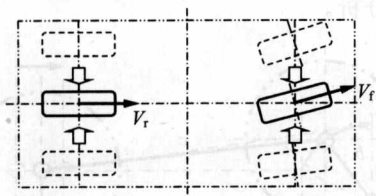


图 4.19 等效两轮模型

现在考虑如图 4.20 所示的两轮模型,它的轴距长为 L ,其两端配置车轮 A 和 B。设车轮相对于轴距的方向是固定的,那么当车轮旋转时,它将以两个车轮旋转中心延长线的交点 O 为中心,保持 ABO 的形状进行运动。若设车轮 A、B 的速度分别为 v_a 、 v_b ,则 $v_a/R_a = v_b/R_b$,这表明各个车轮的速度无法独立控制。

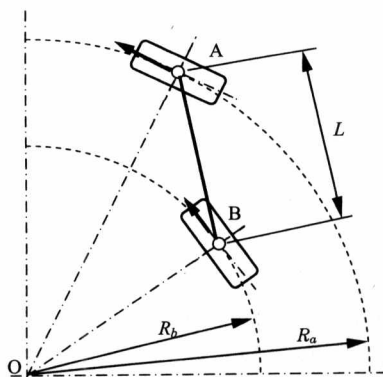


图 4.20 两轮模型的瞬心(平面)

独立两轮驱动的车轮式移动机构相当于该两轮模型的轴距与两个车轮的旋转轴重合的状态。在这种情况下,轴距的瞬心处于包含两车轮旋转中心延长线的无穷远在内的任意位置,此时各车轮的速度能够被独立控制。

借助于让独立运动的两个车轮之一的速度为零而实现的旋转,称之为枢轴旋转。让两个车轮彼此反向旋转实现的旋转,称之为自旋旋转(图 4.21)

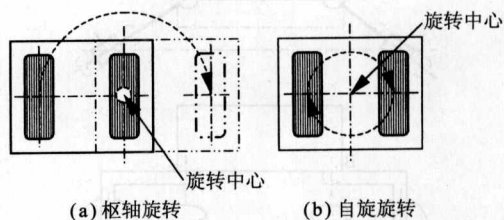


图 4.21 独立两轮驱动的旋转

如果改变图 4.20 中车轮 A 相对于轴距的方向,此时瞬心将在车轮 B 的旋转中心延长线上移动。相对于该瞬心 O 的车轮速度与相对于瞬心的距离之间必须保持上述的关系。

假设在图 4.20 中,车轮 A、B 都能相对于轴距改变方向,此时瞬心(各个车轮旋转中心延长线的交点)将分布在平面各处。

由上述可知,若在车轮式移动式机构上设置坐标原点,则可以分成三种情况:瞬心为一点的情况、在旋转中心延长线上的任意位置的情况以及在面上的情况。

瞬心随时间移动的轨迹被称为中心轨迹。中心轨迹有两种表示方法:一种是用固定在位于移动面上的轴距的固定中心轨迹方法;另一种是用固定在运动节上的坐标系表

示的移动中心轨迹方法。人们可以根据移动的目的对其加以选择,甚至可以同时使用。

在上述的例子中,将连接车轮的节简化为一个进行处理。但是实际上,比如牵引车与拖车,有的场合必须按照多个节来进行处理。由 n 个节构成的机构相对运动的场合,瞬心数可以用式(4.2)来表示。在介绍车轮式移动机构的位置和姿态时,必须指出是车轮式移动机构的哪一节。

$${}_nC_2 = \frac{n(n-1)}{2} \quad (4.2)$$

3) 简化为连杆机构处理^[28]

图 4.22 的两轮模型结构允许车轮在支撑杠杆的根部相对于车体产生旋转,若向平面投影,相当于一个包含 A、D 之间移动面在内的四连杆机构。分析四连杆机构的运动时,一般将 A 或 D 之一选成固定点来进行分析。但车轮式移动机构与此不同,它在移动面上无固定点,因此车轮有 2 个自由度的运动,仿真分析可以证实这一点。

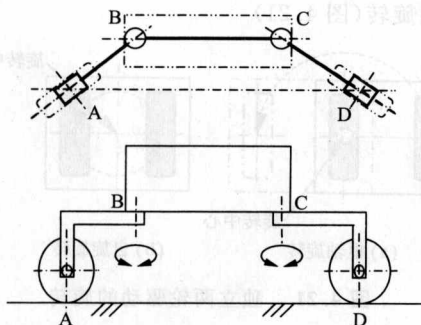


图 4.22 与四连杆机构的比较

如图 4.23 所示,如果连接脚轮着地点和旋转中心的直线与脚轮所受压力作用线的方向一致,那么脚轮向左或向右旋转成为一个不确定的问题。该点称为死点,它存在运动的可能性,但是方向不确定。

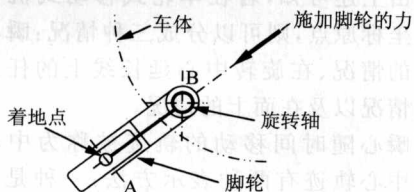


图 4.23 脚轮的问题和死点

车轮式移动机构在铅垂方向的位置和姿态由车轮的旋转中心位置来决定,而旋转中心由移动面来决定。车轮沿水平面进行移动时,运动副之一的车轮旋转轴位于着地点的法线上,此时只要没有围绕着地点的旋转运动,就可以将着地点一侧简化为移动副,如图 4.24 所示。若两轮模型处于倾斜面上(图 4.25),那么简化处理时车轮中心可以用转动副来表示,各个车轮的着地点可以用移动副表示,成为双滑块、双转动机构模型。

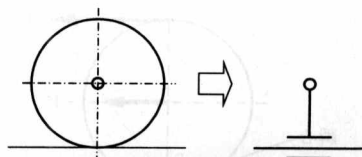


图 4.24 车轮的简化

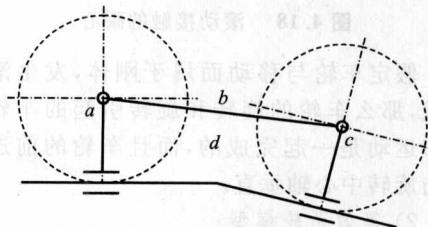


图 4.25 处于倾斜面的模型

跨越台阶时两轮模型的建模如图 4.26 所示。车轮中心和台阶一侧的车轮着地点构成转动副,另一侧车轮的着地点为移动副,于是其相当于 4 节平面偏置曲柄滑块机构模型。在上述模型的基础上还可以进一步开展力学分析。

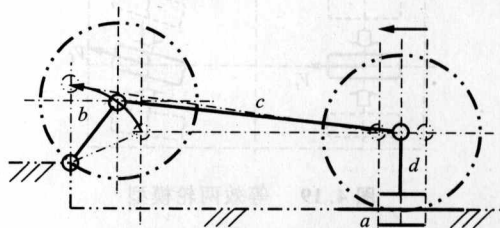


图 4.26 跨越台阶的建模

图 4.27 给出跨越台阶时车轮旋转中心的轨迹。轨迹分析可以采用求解凸轮机构的滚子从动件的轮廓曲线的方法。例如,借助于图解法,沿着移动面的轮廓线,以它为中心移动半径等于车轮半径 a 的圆,于是所获得的圆的上方包络线轨迹即为车轮旋转中心的

轨迹。

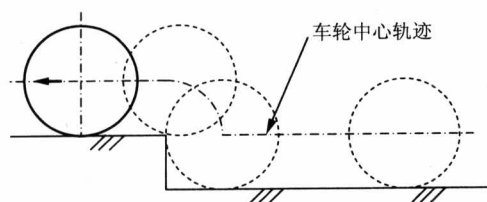


图 4.27 跨越台阶和车轴的轨迹

2. 转向

关于车轮式移动机构的转向,有可置换为上述的等效两轮模型和如同合成型全方位车轮一样不能置换为等效两轮模型两种形式。本小节以前者为对象加以说明。

1) 两轮模型的组合

根据等效两轮模型是否有转向轴和是否有车轮的驱动,采取组合的方式可得表 4.2 和图 4.28。

表 4.2 等效两轮模型和控制轴的组合

分类	车轮 1		车轮 2		控制轴数	备注
	驱	转	驱	转		
A	○	—	○	—	2	独立两轮驱动,结构简单,用作 AVG、移动机器人的机构
B	—	○	○	—	2	对应于两轮车,或者两轮等效模型且后轮驱动方式的汽车
C	○	○	—	—	2	对应于两轮等效模型的前轮驱动方式汽车。第 1 车轮即使垂直于第二车轮也能够旋转
D	○	○	○	—	3	相当于两轮等效模型的全轮驱动方式汽车。移动特性与 C 相同
E	—	○	○	○	3	对应于两轮等效模型的 4WS 汽车
F	○	○	○	○	4	对应于两轮等效模型且独立转向方式的 AGV

〔汽车转向机构〕 为了使汽车 4 个轮子在路面上实现无横向滑动的圆周旋转,必须设定内、外前轮的实转角,满足瞬时恰好位于各个车轮旋转中心轴的延长线上的条件。设前后轮的轴距为 l ,轮距宽度为 b ,则图 4.29

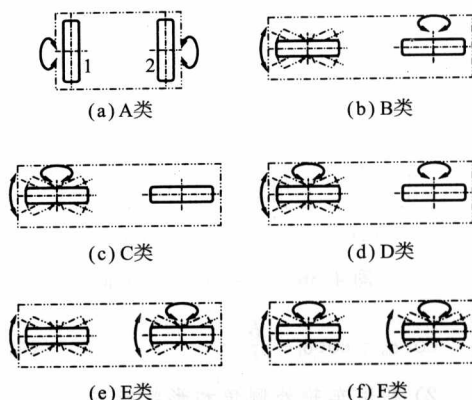


图 4.28 两轮模型的车轮和控制轴的组合

中的内、外前轮的实转角 σ_i 和 σ_o 必须满足式 (4.3) 的关系。该转向理论是由阿克曼和姜托提出的,因此根据这一理论设计的转向伺服机构称为阿克曼型转向机构。实际上汽车经常采用的转向机构如图 4.29 所示,近似为梯形 4 连杆机构(转动副)。

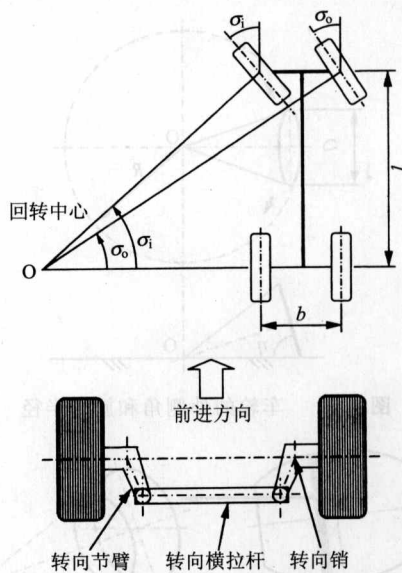


图 4.29 阿克曼型转向机构

根据法规,汽车转向应该用前轮来进行,但也有一些所谓 4WS 的前轮转向、后轮控制的车辆,它们的后轮也能少量进行转向。其中又分为两种:一种为了增加高速行驶的稳定性,对前、后轮施加同相控制;另一种为了减小低速旋转半径,能对前、后轮施加反相控制(图 4.30)。

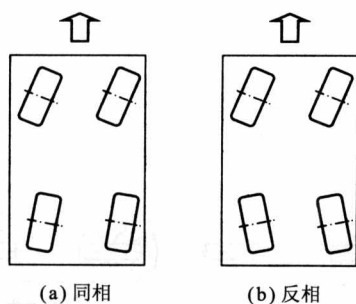


图 4.30 4WS 的车轮方向

$$\cot \sigma_o - \cot \sigma_i = \frac{b}{l} \quad (4.3)$$

2) 利用车轮外侧角和形状转向

如图 4.31 所示,若圆板形车轮有外侧角 η ,则旋转时的瞬心应该为旋转中心延长线与移动面的交点 O 。若设车轮直径为 D ,则车轮旋转半径 R 可以用式 (4.4) 来计算。图 4.5 给出单轮鼓形车轮,它的旋转可以简化为如图 4.32 所示的圆锥台的旋转。

$$R = \frac{D}{2 \cdot \cos \eta} \quad (4.4)$$

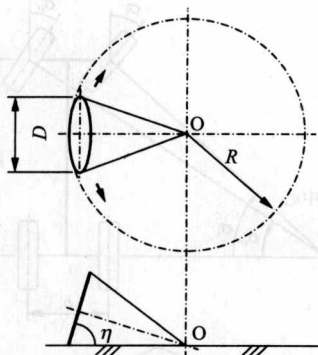


图 4.31 车轮的外侧角和旋转半径

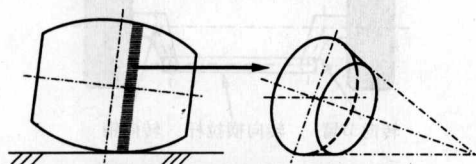


图 4.32 圆锥台车轮和鼓形车轮

3. 车轮的旋转驱动

有两种驱动车轮旋转的方法:一种用电机驱动车轴;另一种对车轮施加力,在车轮前进的方向上产生分力来驱动旋转。本小节将车轮式移动机构视为接受驱动力的反作用力

的一方而简单地介绍旋转驱动。

用电机驱动车轴而使车轮旋转时,该转矩不会导致驱动装置本身的旋转,必须变换为车轮的推进力。因此,一般采用类似汽车的结构,在驱动轮的前方或后方设置车轮,通过车体接受车轮的反力。

对于单轮或平行两轮车轮式移动机构来说,如果重心位置低于车轮转轴,那么作为驱动力位能产生的反力起作用。反之,如果重心位置高于车轮转轴,那么颠覆力矩将产生车轮驱动力的反力用于移动。

4. 车轮式移动机构的稳定

一般都认为,只要是三轮或三轮以上,车轮式移动机构的静态稳定就能够得到保证。实际上,有时车轮形状和移动机构重心的位置会对此有影响,如图 4.33 所示,甚至单轮或两轮移动机构有时也能得到静态稳定。

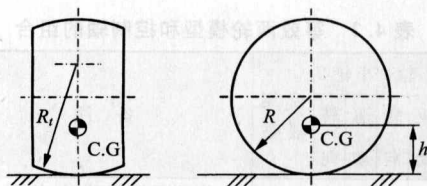


图 4.33 单个车轮的稳定

将车轮数和车轮式移动机构的稳定性加以整理,可得表 4.3。

表 4.3 车轮数和车轮式移动机构的稳定性

车轮数	稳定性	车轮式移动机构的结构
单轮	静态稳定	重心低于含着地点的车轮圆弧中心(图 4.33)
	动态稳定(单方向)	重心高于车轴,在车轴平行方向上利用车轮截面的形状均能落入稳定范围
	动态稳定(两个方向)	重心高于包含着地点的车轮圆弧中心,即使在车轴平行方向上也必须靠车轮截面的形状才能获得动态稳定
双轮	静态稳定	① 在平行配置的两个车轮之间,重心位置低于车轴的机构 ② 在车轴平行方向上靠车轮截面的形状把落入稳定范围的车轮配置在①以外的位置

续表 4.3

车轮数	稳定性	车轮移动机构的结构
双轮	动态稳定 (单方向)	③ 重心位置高于平行配置的两个车轮的车轴(实现前进方向动态稳定所必需的)
	动态稳定 (单方向)	④ 以点着地的车轮被配置在直线上(实现车轴平行方向上的动态稳定所必需的)
三轮 及三 轮以 上	静态稳定	基本上能得到静态稳定

4.1.4 运动学

1. 与机械手的区别

为了让移动机器人能顺利到达目的地,最低限度需要进行路径规划、实现沿该路径的移动控制以及确认是否正确地沿规划的路径移动。其中,沿路径的移动控制、确认移动控制的结果,即移动轨迹,对于移动机器人来说是不可缺少的。

所谓运动学,是指“描述机构各关节运动和机构中感兴趣的点(代表点)的运动之间的几何学关系”。一般来说,固定机械手在环境中基准点可循,所以空间位置与关节位移几乎是一一对应的,因此运动学最基础的关系与位移密不可分。与此不同的是,移动机器人在环境中没有基准点,与位移有关的运动学在此不成立。移动机器人主要应该考虑与运动速度有关的运动学,而不是考虑位移量,即描述二维移动面上移动机构车体的移动速度与车轮驱动速度和转向速度的关系,是车轮式移动机构运动学的基本关系。

移动机器人运动学也分为正运动学和逆运动学问题。正运动学是给定驱动移动机构的关节速度(驱动器速度),求解车体的移动速度;反之,逆运动学是给定移动机器人车体的移动速度,求解实现车体移动速度所需要的关节速度(驱动器速度)。

一般来说,由于移动机构的限制,在多数情况下做不到移动机器人能够沿任意移动路径运动。因此,必须首先设计出适合移动机构的路径,再进一步规划在该路径上移动的速度,然后作为运动学的问题进行处理。

这里,我们假定移动机器人移动速度较低,对其不作动力学处理也能开展运动分析,下面对若干典型车轮式移动机构作正运动学和逆运动学的介绍^[29]。

2. 独立两轮驱动

图 4.34 所示为独立两轮驱动型移动机构的模型。图 4.34 中,设两个车轮的旋转速度分别为 ω_l 及 ω_r , 车轮直径为 r , 轮距为 l_l 。相对于固定坐标系,用移动机构的代表点,即两个车轮中点 P 的坐标 x 、 y 和 θ 来描述车体的位置和姿态,则与速度有关的正运动学可以表示为式(4.5)。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\cos\theta}{2} \\ \frac{\sin\theta}{2} & \frac{\sin\theta}{2} \\ \frac{1}{l_l} & -\frac{1}{l_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r\omega_r \\ r\omega_l \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

因而,相对于固定坐标系的位置和姿态可以通过将上述速度关系式积分求得

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{l_l} \int_0^t r(\omega_r - \omega_l) dt \quad (4.6)$$

$$x = x_0 + \frac{r}{2} \int_0^t \cos\theta (\omega_r + \omega_l) dt \quad (4.7)$$

$$y = y_0 + \frac{r}{2} \int_0^t \sin\theta (\omega_r + \omega_l) dt \quad (4.8)$$

式中, θ_0 、 x_0 、 y_0 为 $t=0$ 时的位置和姿态。为了通过这些式子具体计算轨迹,必须给出两轮速度 ω_r 及 ω_l 的时间序列数据,然后进行数值积分。

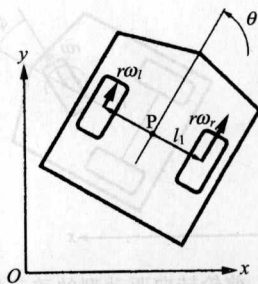


图 4.34 独立两轮驱动型的移动机构模型

独立两轮驱动型移动机构模型的逆运动学可以根据正运动学的基本公式,设车体移动速度 \dot{x} 、 \dot{y} 、 $\dot{\theta}$ 给定,利用下式求出驱动器速度 ω_l 及 ω_r 。

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (4.9)$$

$$\omega_r = \frac{2v + l_1 \dot{\theta}}{2r} \quad (4.10)$$

$$\omega_l = \frac{2v - l_1 \dot{\theta}}{2r} \quad (4.11)$$

式中, v 为两车轮中点 P 的平移速度; l_1 为轮距。

3. 前轮转向驱动

如图 4.35 所示, 设前轮转向驱动型移动机构的代表点为后轮的中点 $P(x, y)$, 另设车体相对于固定坐标系的姿态为 θ , 前轮相对于车体的姿态角为 ϕ , 转向角速度为 $\dot{\phi}$, 前轮与后轮间的轴距为 l_2 。再设前轮的旋转驱动速度为 ω , 车轮直径为 r , 由于代表点 P 的平移速度为 $v = r\omega \cos\phi$, 故其正运动学可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\theta & 0 \\ \cos\phi \sin\theta & 0 \\ \frac{\sin\phi}{l_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r\omega \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

如前所述, 相对于固定坐标的位置和姿态可以从表示速度关系的式子积分求得

$$\phi = \phi_0 + \int_0^t \dot{\phi} dt \quad (4.13)$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega \sin\phi dt \quad (4.14)$$

$$x = x_0 + r \int_0^t \omega \cos\phi \cos\theta dt \quad (4.15)$$

$$y = y_0 + r \int_0^t \omega \cos\phi \sin\theta dt \quad (4.16)$$

式中, $\phi_0, \theta_0, x_0, y_0$ 为 $t=0$ 时前轮的姿态以及车体的位置和姿态。

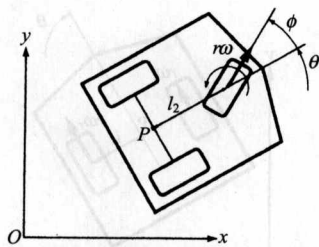


图 4.35 前轮转向驱动型的移动机构模型

设两个后轮的中点 P 的平移速度为 x 及 y , 车体的旋转速度为 θ , 如果仍然用与正运动学相同的变量, 则前轮转向运动型的逆运动学为

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (4.17)$$

$$v = r\omega \cos\phi \quad (4.18)$$

$$\dot{\theta} = \frac{\sin\phi}{l_2} r\omega \quad (4.19)$$

从后两个式子中消去 ϕ , 则有

$$r^2 \omega^2 = v^2 + l_2^2 \dot{\theta}^2 \quad (4.20)$$

$$\omega = \frac{1}{r} \sqrt{v^2 + l_2^2 \dot{\theta}^2} \quad (4.21)$$

将该结果代入式(4.18)或式(4.19), 可得

$$\sin\phi = \frac{l_2 \dot{\theta}}{\sqrt{v^2 + l_2^2 \dot{\theta}^2}} \quad (4.22)$$

在满足上述条件后, 需要选择 v 和 $\dot{\theta}$ 。若路径形状已给定, 则根据它的曲率, 求解路径上各个点的瞬心, 得到 ϕ , 于是可决定上述约束条件式(4.22)的左边。所以, 指定路径上移动的速度 v , 由式(4.22)决定 $\dot{\theta}$, 再根据式(4.21)可以求出驱动器的指令值 ω 。控制时, 只要将沿路径的 ϕ 的数据按照移动速度变换为时间序列数据, 将满足该序列数据的 ϕ 作为命令输入转向驱动器即可。

4. 前轮转向驱动型

如图 4.36 所示, 与前轮驱动转向型一样, 设代表点为后轮的中点 $P(x, y)$, 车体相对于固定坐标系的姿态为 θ , 相对于前轮的姿势角为 ϕ , 转向角速度为 $\dot{\phi}$, 前轮与后轮之间的轴距为 l_2 。再设后轮的平均旋转驱动速度为 ω , 车轮直径为 r , 由于代表点 P 的平移速度为 $v = r\omega$, 故正运动学可用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ \frac{\tan\phi}{l_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r\omega \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

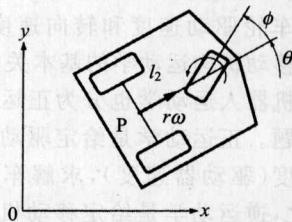


图 4.36 前轮转向驱动型的移动机构模型

因而, 相对于固定坐标系的位置和姿态可以将上述速度关系式积分而求得

$$\phi = \phi_0 + \int_0^t \dot{\phi} dt \quad (4.24)$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega \tan\phi dt \quad (4.25)$$

$$x = x_0 + r \int_0^t \omega \cos \theta dt \quad (4.26)$$

$$y = y_0 + r \int_0^t \omega \sin \theta dt \quad (4.27)$$

式中, $\phi_0, \theta_0, x_0, y_0$ 为 $t=0$ 时前轮的姿态以及车体的位置和姿态。

与前面的例子相同, 设两个后轮的中点 P 的平移速度为 \dot{x} 及 \dot{y} , 车体的旋转速度为 $\dot{\theta}$, 采用与正运动学相同的变量, 则前轮转向后轮驱动型的逆运动学为

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (4.28)$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (4.29)$$

$$\tan \phi = \frac{l_2 \dot{\theta}}{v} \quad (4.30)$$

与前例相同, 在满足式 (4.30) 给出的条件后, 需要选择 v 及 $\dot{\theta}$ 。即若给定路径形状, 则根据它的曲率, 求解路径上各个点的瞬时, 得到 ϕ , 于是可以决定上述约束条件的左边。所以, 若指定了路径上移动的速度 v , 则由式 (4.30) 可决定 $\dot{\theta}$ 。控制时, 只要将沿路径的 ϕ 的数据按照动速度变换为时间序列数据, 将满足该序列数据的 $\dot{\phi}$ 作为命令输入转向驱动器即可。

5. 独立四轮转向

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_A \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 + \theta) & 0 & 0 \\ \sin(\phi_1 + \theta) & 0 & 0 \\ \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{L \cos \phi_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\dot{x} = \dot{x}_A + \frac{B}{2} \dot{\theta} \sin \theta \quad (4.32)$$

$$\dot{y} = \dot{y}_A + \frac{B}{2} \dot{\theta} \cos \theta \quad (4.33)$$

图 4.37 的结构可以通过变换为假想两轮车, 将前、后轮的两个转向角 ϕ_1 及 ϕ_2 以及某一个车轮的驱动速度 v_1 作为控制量来处理。移动机构将围绕两个车轮的转向角所形成的瞬时中心 O 轴做旋转运动。因此, 图 4.37 中的车轮设置点 $A(x_A, y_A)$ 可用式 (4.31) 来表示。

因此, 相对于固定坐标系的位置和姿态可以将这些速度关系式积分而求得

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{L \cos \phi_2} v dt \quad (4.34)$$

$$x_A = x_0 + \int_0^t \cos[\phi_1 + \theta_0] + \int_0^t \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{L \cos \phi_2} v dt \Big] v dt \quad (4.35)$$

$$y_A = y_0 + \int_0^t \sin[\phi_1 + \theta_0] + \int_0^t \frac{\sin(\phi_2 - \phi_1)}{L \cos \phi_2} v dt \Big] v dt \quad (4.36)$$

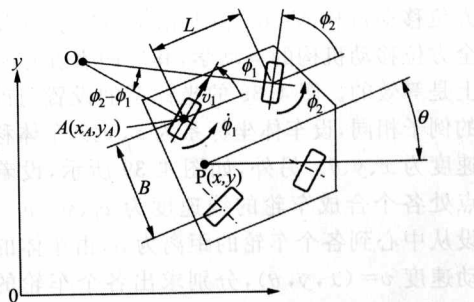


图 4.37 独立四轮转向型的移动机构模型

6. 合成型全方位车轮机构的移动

将斯坦福大学与 Unimation 公司联合开发的合成轮建模, 其顶视图如图 4.38 所示。在图 4.38 中, 设各车轮旋转的圆周速度为 t_1, t_2, t_3 , 车体坐标系为 x, y , 平移速度为 $v = (\dot{x}, \dot{y})$, 旋转速度为 $\dot{\theta}$ 。首先, 由车体的移动速度 $v = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ 分别求出各个车轮的速度, 假定速度是线性的, 并将各个速度进行合成, 则逆运动学可按式求出。

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & d \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

式中, d 表示从中心到各个车轮的距离^[18]。

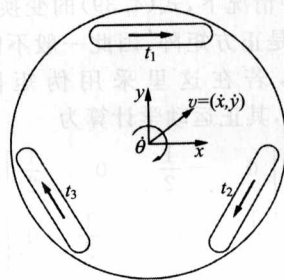


图 4.38 合成型全方位车轮的移动机构模型

根据车轮旋转速度求车体移动运动速度的正运动学问题可以由逆运动学矩阵的逆矩

阵来计算,公式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

下面我们来介绍东京工业大学开发的全方位移动机构 Vuton 和理化学研究所开发的全方位移动机构的运动学,其实两者在运动学上是等效的。图 4.39 的坐标系的设置与前面的例子相同,设车体坐标系为 x, y, θ , 车体移动速度为 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$ 。另外,如图 4.39 所示,设着地点处各个合成车轮的线速度为 v_1, v_2, v_3, v_4 。设从中心到各个车轮的距离为 d , 由车体的移动速度 $v = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$, 分别求出各个车轮的速度,假定速度是线性的,并将各个速度进行合成,则按如下式所示可以求出逆运动学^[19]:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & d \\ -1 & 0 & d \\ 0 & -1 & d \\ 1 & 0 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

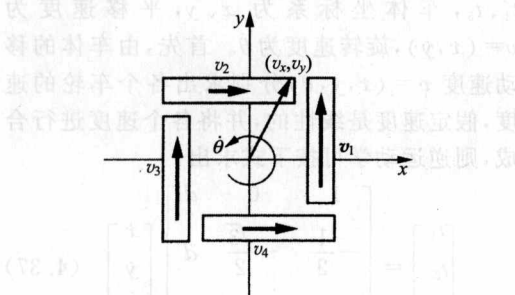


图 4.39 无限轨道型合成车轮 (4 轮) 的移动机构模型

在这种情况下,式(4.39)的变换矩阵为 4 行 3 列,不是正方形矩阵,因此一般不能求出它的逆矩阵,若在这里采用伪矩阵 $A^* = (A^T A)^{-1} A^T$, 其正运动学计算为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{4d} & \frac{1}{4d} & \frac{1}{4d} & \frac{1}{4d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

7. 脚轮型驱动轮机构的全方位移动

前面,在图 4.14 中介绍了脚轮型驱动机构的全方位移动车。图 4.40 给出了脚轮型驱动机构的模型,设图 4.40 中的各转向轴点的平移速度为 x_a, y_a, x_b, y_b , 则其正运动学为式(4.41)。

由于转向轴之间的距离是固定的,故其逆运动学为式(4.42)^[24]。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{w} c\phi_v & \frac{1}{w} s\phi_v & -\frac{1}{w} c\phi_v & -\frac{1}{w} s\phi_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

式中, $c\phi_v = \cos\phi_v, s\phi_v = \sin\phi_v$ 。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{w}{2} \cos\phi_v \\ 0 & 1 & \frac{w}{2} \sin\phi_v \\ 1 & 0 & -\frac{w}{2} \cos\phi_v \\ 0 & 1 & -\frac{w}{2} \sin\phi_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

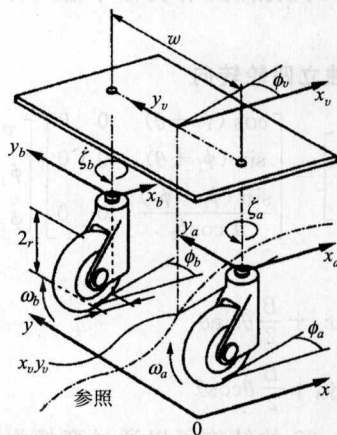


图 4.40 脚轮型驱动机构的移动机构模型

8. 拖车

工业车辆中多使用拖车,它有一个点与移动机构连接被牵引,其本身不带动力。在图 4.41 所示的模型中,拖车与牵引车在 Q 点连接。当被牵引车(图 4.41 中实线所示)在 Q 点以 $v = (v_x, v_y)^T$ 的速度向量被牵引时,得到式(4.43)。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_t \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

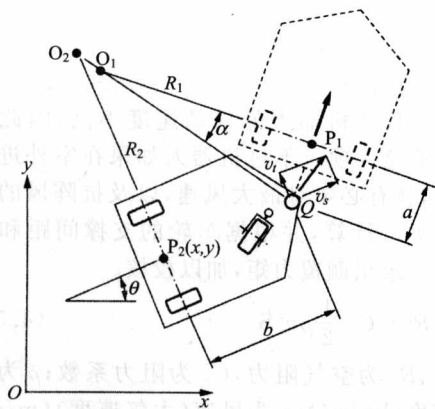


图 4.41 牵引车的移动机构模型

由于路径形状的变换和牵引车相对位置的影响,拖车的姿态有时会乱套。这里虽然尚未涉及动力学问题,但由于拖车惯性力通过连接部分作用于牵引车,反过来会对牵引车的姿态造成影响,详细内容请参阅有关参考文献^[30]。

小森谷 清

4.1.5 力学

设计车轮式移动机构时必须进行力学分析。在本节中将以静力学为中心进行说明。

1. 摩擦^[31]

互相接触的两个物体的接触面上产生的妨碍彼此运动的力,即摩擦。如果在物体之间的接触点存在速度差,这种摩擦是滑动摩擦,即将发生滑动瞬间之前的最大摩擦力称为最大静摩擦力,一般说到摩擦力,就是指最大静摩擦力。如图 4.42 所示,摩擦力 F 取决于两个物体接触状态所决定的摩擦系数 μ (由实验求出),以及物体在垂直方向上的分力 N ,它们的关系可以用式(4.44)表示。将最大静摩擦力 F 和分力 N 的合力 R 与垂直方向所形成的夹角 λ 称为摩擦角, μ 与 λ 有如式(4.45)所示的关系:

$$F = \mu \cdot N \quad (4.44)$$

$$\tan \lambda = \frac{F}{N} = \mu \quad (4.45)$$

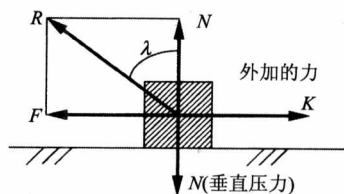


图 4.42 摩擦力

已知的摩擦经验律有库仑定律(Coulomb's law)。

① 摩擦与作用于接触面的垂直载荷成正比,与视在接触面积无关。

② 动摩擦力与滑动速度无关。

如果在物体之间的接触点处不存在速度差,而有滚动发生,则称此时受到的阻力为滚动摩擦。在车轮转动的过程中,由于载荷的作用,接触部分的周边有车轮变形或移动面的变形。在这种状态下,车轮滚动的情况可以描述为如图 4.43 所示,相当于瞬心向旋转方向偏移了距离 f 。 f 相对于车轮半径 r 之比 f/r 相当于滚动摩擦系数 μ_r 。

$$F = \mu_r \cdot N \quad (4.46)$$

滚动阻力也随车轮与移动面的接触状态而异。滚动阻力 μ_r 也有一种计算方法,如式(4.47)所示,即由表 4.4 的滚动阻力系数 μ' 乘以表 4.5 的相对于路面状态的滚动阻力比。考虑到在开始滚动的瞬间其阻力高于通常的滚动阻力,因此有时还加上起动阻力项。

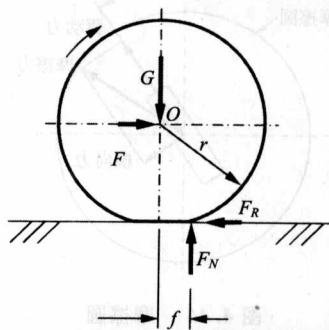


图 4.43 滚动阻力

摩擦阻力相同,滚动阻力也需要通过实验而获得,在未知的条件下最好分别对其进行测量:

$$\mu_r = \mu'_a \quad (4.47)$$

约束车轮,不让它滚动,从水平方向依次沿整个圆周加上外力来测量车轮开始滑动的

表 4.4 滚动阻力系数 μ' (实验值)^[32]

轮胎材料		路面	
JIS 分类	名称	铁板	混凝土
A·B	一般橡胶车轮	0.018~0.025	0.02~0.03
C	丁二烯车轮	0.01~0.014	0.011~0.016
D	聚氨酯胶车轮	0.006~0.008	0.006~0.015

表 4.5 路面条件与滚动阻力比 a ^[32]

路面条件	滚动阻力比
沥青或混凝土铺设路面	约 1
仔细维护的碎石路面	2
多碎石凹凸路面	5.3
新铺设的碎石路面	8.7
黏土层路面	10
砂或石灰质路面	11.3
干砂地	17

值,这时可以求出以最大静摩擦力为半径的摩擦圆(图 4.44)。我们考虑汽车行驶时前轮转向的情况,如图 4.44 所示,车轮发生前进的驱动力和防止横向偏移的横向力(也称为转向力)。只有在车轮不滑动的范围内才有可能对车轮式移动机构实施控制,因此我们必须设法让车轮驱动力和横向力的合成摩擦力落入摩擦圆的范围内。

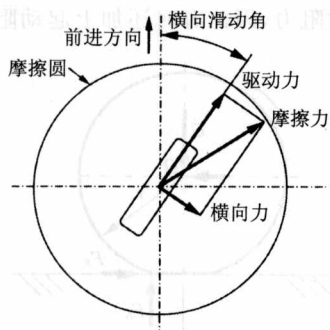


图 4.44 摩擦圆

2. 车轮式移动机构的行驶阻力^[33]

1) 与汽车的行驶阻力的比较

如式(4.48)所示,汽车的行驶阻力由滚动阻力、空气阻力、坡度阻力、加速阻力来决定,这种关系对车轮式移动机构来说是普遍适用的:

$$R = R_r + R_a + R_s + R_h \quad (4.48)$$

式中, R_r 为滚动阻力; R_a 为空气阻力; R_s 为坡

度阻力; R_h 为加速阻力。

(1) 滚动阻力 滚动阻力用式(4.49)来表示,由于汽车的 θ 很小,故多数省略。

$$R_r = \mu_r \cdot W \cdot \cos\theta \quad (4.49)$$

式中, R_r 为滚动阻力(N); μ_r 为滚动阻力系数; W 为来自车辆的载荷(N); θ 为倾斜角($^\circ$)。

(2) 空气阻力 空气阻力用式(4.50)来表示。移动机器人的移动速度不高,因此可以省略这一项。不过机器人如果在室外进行移动,就有必要对最大风速,以及抗阵风的安全性进行计算,并根据车轮的支撑间距和重心高度求出颠覆力矩,加以校核。

$$R_a = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (4.50)$$

式中, R_a 为空气阻力, C_x 为阻力系数; ρ 为空气密度(kg/m^3); v 为风速(大气速度)(m/s); S 为正面投影面积(m^2)。

(3) 坡度阻力 如图 4.45 所示,与移动面平行的分量形成坡度阻力,它可以用式(4.51)求出(图 4.44)。

$$R_s = W \cdot \sin\theta \quad (4.51)$$

当有多个车轮在凹凸不平的移动面上进行移动时,需要针对各个车轮计算车轴 O 与车轮和移动面的着地点 P 的水平距离 f 与加在车轮上的载荷 W_i 相乘之积得到力矩,并加以合成,来求得实际的行驶阻力(图 4.46)。

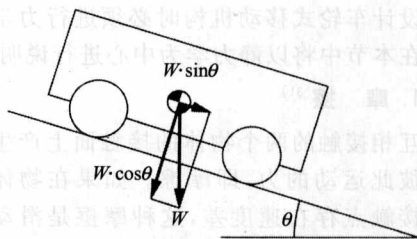


图 4.45 坡度阻力

(4) 加速阻力 加速阻力有两种:一种是对直线运动的加速阻力;另外一种是对车轮、减速器、电机等旋转体的加速阻力,分别对应于式(4.52)的第一项和第二项。例如,在汽车行业中,选取相当于第二项旋转部分质量的依据是 JIS 规定的方法,如果进行轿车加速试验,在包含发动机的条件下,近似取成空车质量的 0.8 倍;如果是进行滑行试验和制动试验,那么近似取成空车质量的 0.05 倍。

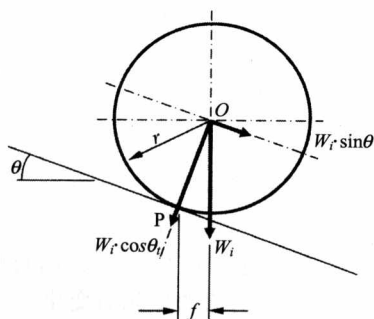


图 4.46 单个车轮的坡度阻力

$$R_h = \alpha \left(m + \frac{1}{r^2} \sum_{n=1}^n I_n i_n^2 \right) \quad (4.52)$$

式中, α 为加速度; r 为驱动车轮的半径; I_n 为惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); i_n 为该旋转体相对于驱动车轮的转速比。

当直线行进的车轮式移动机构发生转向时, 惯性力起到阻力的作用, 对驱动轮的控制也施加影响, 可见动力学与稳定性有关, 也必须对其加以研究。

2) 各种行驶阻力

除了与汽车的一般项目相对应的部分以外, 车轮式移动机构的行驶阻力还包括从动轮与驱动轮的位置关系而引起的阻力、跨越台阶发生的阻力等。

(1) 载荷分担 车轮式移动机构的行驶阻力是各个车轮的行驶阻力的总和, 需要分配到各个车轮上来分别承担。如果物体处于静止状态下, 对于力的垂直分量水平分量和绕任意点的力矩, 式(4.53)~式(4.55)必须成立。

$$\text{垂直方向} \quad \sum Y = 0 \quad (4.53)$$

$$\text{水平方向} \quad \sum X = 0 \quad (4.54)$$

$$\text{力矩} \quad \sum M = 0 \quad (4.55)$$

加在车轮上的载荷可以根据车轮、车体等各部分构件的质量和重心位置进行计算。以图 4.47 的车辆模型为例, 为了简单起见, 可以假定质量 W 集中于重心, 通过式(4.56)和式(4.57)求得各个车轮的载荷。即使是转向架台车结构, 也基本上可以简化成两点支撑方式来进行计算。

如果选用市场出售的车轮商品, 为了计算载荷小于车轮的允许载荷, 应该选用承受载荷能力较大的大尺寸车轮, 或者增加车

轮的数量。

$$R_1 = \frac{W \cdot l_2}{l_1 + l_2} \quad (4.56)$$

$$R_2 = \frac{W \cdot l_1}{l_1 + l_2} \quad (4.57)$$

其中,

$$W = R_1 + R_2, \quad l = l_1 + l_2$$

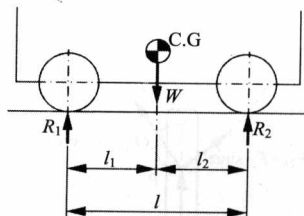


图 4.47 载荷分配

(2) 车轮和力的方向以及行驶阻力 如图 4.48 所示, 如果相对车轮前进方向从斜向施加外力, 该力可以分解为车轮前进方向的力 F_{1x} 和车轴平行方向的力 F_{1y} 。设加在车轮上的载荷为 W , 则车轮的滚动阻力为 $\mu_r \cdot W$ 。设它与 F_{1x} 相等, 则所需要的 F_1 可以用 $\mu_r \cdot W / \cos \beta$ 求出, 它随 β 的增大而增加。 β 在 $\mu_r / \cos \beta \leq \mu$ 的范围内有效。

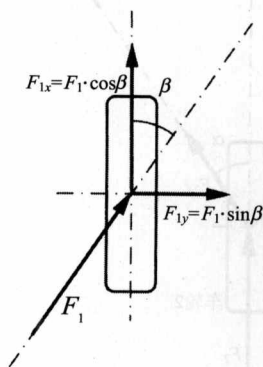


图 4.48 加力方向及行驶阻力

由此可知, 对于前轮转向方式的车轮式移动机构, 如果转向轮为从动轮, 那么行驶阻力随转向角度的变化而变化。改成成型全方向车轮的各种全方向车轮也同样, 行驶阻力取决于滚子相对于前进方向上的角度的变化而变化。如图 4.49 所示, 杆件的一端安装车轮, 另一端能够旋转, 若沿车轮的前进方向对该机构加力 F_2 , 该力可以分解为朝向旋转中心的力 F_{2a} 以及与旋转力矩相对应的力 F_{2b} 。因此, 在图 4.50 的两轮模型中, 将车轮 1

设为从动轮, 车轮 2 设为驱动轮, 若对车轮 2 施加驱动力 F_2 , 则对车轮 1 的推进作出贡献的力为 $F_2 \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta$; 若它的数值大于车轮的滚动阻力, 车轮就开始旋转。

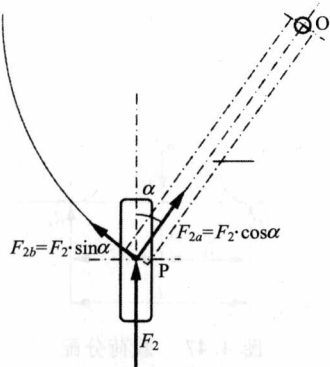


图 4.49 旋转中心及车轮的力分解

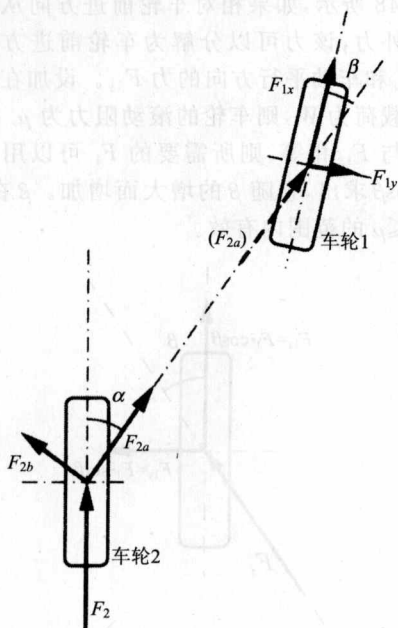


图 4.50 两轮模型的车轮位置和行驶阻力

设施加在车轮 1 上的载荷为 R_1 , 滚动阻力为 μ_{r1} , 加在车轮 2 上的载荷为 R_2 , 滚动阻力为 μ_{r2} , 则车轮 2 的驱动力 F_2 必须满足式 (4.58)

$$F_2 > \mu_{r1} \cdot R_1 + \frac{\mu_{r2} \cdot R_2}{(\cos\alpha \cdot \cos\beta)} \quad (4.58)$$

其中,

$$\frac{\mu_{r1}}{\cos\beta} \leq \mu_1, \quad \frac{\mu_{r2}}{\cos\alpha} \leq \mu_2$$

如果汽车用后轮驱动, 那么 α 可视为 0,

行驶阻力将随前轮的转向角的变化而变化。若让前轮驱动的汽车在行驶过程中转向, 则在施加后轮前进力的同时将产生绕该着地点旋转的力, 不过它的值较小, 与全轮驱动相同, 用 μ_{ra} 表示。

推动车轮的力并不仅限于朝向移动面的水平方向。如图 4.51 所示, 往从动轮旋转中心施加力 F , 它可以分解为沿水平方向的力 F_v 和沿垂直方向的力 F_h 。车轮的行驶阻力随垂直方向分力的值的变化而变化。

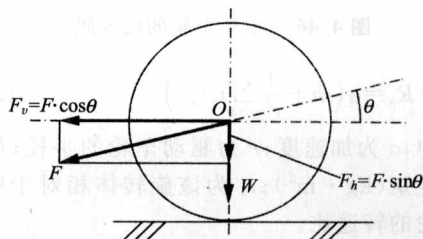


图 4.51 外力 and 车轮的旋转(立面)

(3) 跨越台阶阻力 跨越台阶时, 根据车轮是从动轮还是驱动轮, 作用于车轮上的力是不一样的。如果是全轮驱动, 需要将作用于各个车轮上的力进行合成后再分析。如果车轮一边转动一边上台阶, 那么可以利用惯性矩, 不过有关的说明在本书中予以省略。

① 从动轮。图 4.52 所示的情况是后轮驱动, 用从动轮上台阶。若设台阶的高度为 s , 车轮的半径为 r , 则距离 l 和 α 可以用式 (4.59) 及式 (4.60) 求出

$$l = \sqrt{r^2 - (r-s)^2} = \sqrt{2rs - s^2} \quad (4.59)$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{s}{r}\right) \quad (4.60)$$

其中,

$$s \leq r$$

若对后轮施加与移动面平行的推进力 F_2 , 则相当于对前轮施加力 $F_{2a} (= F_2 \cdot \cos\beta)$ 。该力分解为朝向车轮与台阶接触点的力 $F_{1b} (= F_{2a} \cdot \sin(\alpha - \beta))$ 和以该接触点为中心产生旋转力矩的力 $F_{1a} (= F_{2a} \cdot \cos(\alpha - \beta))$ 。这样, 设前轮分担的载荷为 R_1 , 则只要在后轮不产生滑动的范围内满足式 (4.61), 车轮就能够跨越台阶:

$$R_1 l < F_{1a} r_1 \quad (4.61)$$

② 驱动轮。假设图 4.52 中以前轮作为驱动轮, 那么跨越台阶的前提是车轮在台阶

的凸角处不发生滑动。若驱动轮本身产生的转矩 T 满足式(4.62), 前轮就能够上台阶:

$$T = R_1 l = R_1 r \cdot \cos \alpha \quad (4.62)$$

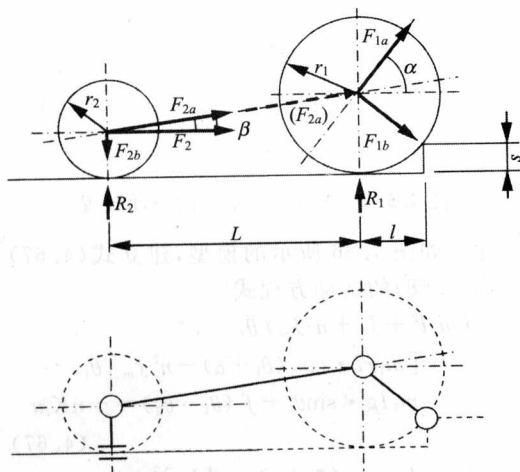


图 4.52 从动轮跨越台阶

实际上, 由于车轮具有弹性, 在台阶凸角部分它会发生一些变形, 即 l 将稍有缩短。因此, 跨越台阶所需要的力将变小。还有其他措施能改进跨越能力, 如在车轮表面附加突起的花纹, 如果它能勾住台阶的凸角, 就能获得比摩擦阻力更高的剪切力。

在台阶高度比前轮半径大的条件下, 如果前轮是从动轮, 并且前轮的直径等于或小于后轮, 那么是无法实现台阶跨越的。但是, 采取增大前轮(图 4.52), 或者让前后轮都驱动且不发生滑动, 那么仍可能跨越台阶。

(4) 机构控制引起的行驶阻力 在本节(2)中叙述了车轮方向对行驶阻力的影响, 如果存在多个驱动轮, 有时还会因各车轮速度控制状态的不同而产生阻力。

与驱动轮数量少的情况相比, 全轮驱动通过将驱动力分散给各个车轮, 能够减少滑动的发生。但是, 传动机构的结构会影响到车轮本身发生行驶阻力。图 4.53 给出了一个两轮模型, 设后轮的速度 v_2 一定, 当前轮从平坦路面转换到倾斜路面时, 前轮与移动面的着地点将发生变换, 轴距(相当于车体)的姿态也会发生改变, 因此前轮的速度 v_1 也应该相应地发生改变。如果全轮驱动不能分别调整前后轮的车轮速度, 那么遇到倾斜路面时, 前后轮的速度差就会产生行驶阻力, 造成车轮滑动; 或者如果行驶路面的强度较低, 则

将造成行驶路面的变形。如果移动机构的单侧有 3 个车轮或更多, 那么行驶阻力的情况将取决于悬挂的结构, 有时中间车轮会处于悬空的状态。

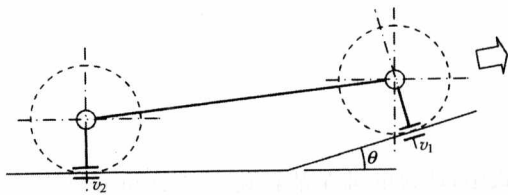


图 4.53 从平面向斜面过渡的车轮移动

(5) 车轮的转向阻力 如图 4.54 所示, 在车轮停止的状态下, 以着地点的铅垂线为中心车轮转动时, 在其接触部分的周边将发生滑动摩擦。以汽车为例, 若在停止状态下转向, 最初阶段由于轮胎维持与行驶路面的接触产生弹性变形, 随后超过弹性变形的极限, 产生滑动。这分别与静摩擦阻力和动摩擦阻力的关系相对应。在车轮滚动的状态下, 由于它始终以不同圆周表面与行驶路面接触, 因此与静止状态相比, 车轮的弹性变形量少, 与之相应的转向阻力也低。

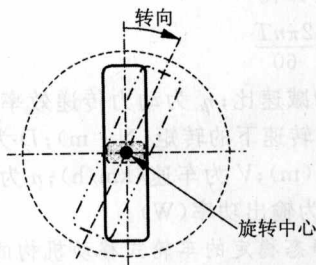


图 4.54 车轮的原地转向

可以设定车轮和使用条件、环境, 通过实验求出行驶阻力的大小。

3. 车轮的驱动力

1) 基本关系

在式(4.46)中, 从滚动阻力、空气阻力、坡度阻力、车轮产生的阻力、台阶产生的阻力各项给定了移动环境, 而后又决定了最大速度、车轮式移动机构的结构(包含车轮直径、材料选择等), 驱动力就大致可以确定下来了。不过, 加速阻力与加速度的大小, 即如何设定驱动力裕度(驱动力与行驶阻力之差), 在很大程度上受到设计者意图的左右。如果移动环境中包含台阶或斜面, 有时可以将对

台阶、斜面的驱动力视为水平面移动所需要的驱动力裕度。

汽车的行驶性能图表示行驶阻力(除加速阻力以外的阻力)与车速的关系。根据式(4.52),在水平移动面上,驱动力裕度产生的加速度 α 可用式(4.63)求出。

$$\alpha = \frac{P - R_0}{m + \frac{1}{r^2} \sum_{n=1}^n I_n i_n^2} \quad (4.63)$$

式中, P 为电机在某转速下的驱动力(N); R_0 为水平路面的行驶阻力(随车速变化)(N); m 为车辆质量(kg); r 为驱动车轮的半径; I_n 为惯性矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); i_n 为旋转体相对于驱动车轮的转速比。

设定 α ,将式(4.63)重新改写,可以求出 P 。

根据式(4.64)可以求出电机转矩与车轮驱动力的关系,而式(4.65)表示出车速及电机转速的关系。因此,可以根据电机与减速器的减速比组合来选择合适的参数。电机输出功率也可以用式(4.66)来表示。

$$P = \frac{i \cdot \eta \cdot T \cdot 2}{D} \quad (4.64)$$

$$V = \frac{60\pi D n}{i \times 10^3} \quad (4.65)$$

$$H = \frac{2\pi n T}{60} \quad (4.66)$$

式中, i 为减速比; η 为动力传递效率; T 为电机在特定转速下的转矩($\text{N} \cdot \text{m}$); D 为车轮的有效直径(m); V 为车速(km/h); n 为转速(r/min); H 为输出功率(W)。

2) 静态稳定的车轮式移动机构的驱动

设单轮或平行两轮车轮式移动机构的重心位于车轮旋转中心的下方(图4.55),靠内部机构将重心位置偏离着地点,就能够产生 $W \cdot l$ 的转矩。假如该转矩大于车轮的起动力,车轮就开始旋转。可见,利用重心位置进行控制,就能够实施行驶控制。用圆柱形或球形车轮构成的机构可以采用这种推进的方法。另外,球形车轮还能够实现全方位移动。

3) 动态稳定所需的车轮式移动机构的驱动^[34]

如4.1.1小节所述,人们正在进行车轮式倒立摆的动态稳定研究。为了实现动态稳定,需要建立移动机构的运动方程式,求出控制所必需的转矩。

松本等将位于一定角度斜面上的倒立摆

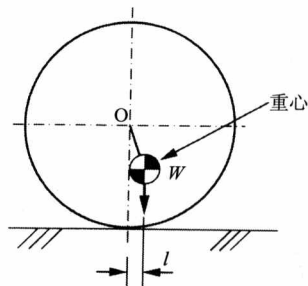


图 4.55 静态稳定车轮的驱动装置

简化为如图4.56所示的模型,建立式(4.67)及式(4.68)的运动方程式。

$$\begin{aligned} & (m_1 l^2 + J_1 + n^2 J_m) \ddot{\theta}_1 \\ & + [m_1 r l \cdot \cos(\theta_1 + \alpha) - n^2 J_m] \ddot{\theta}_2 \\ & - m_1 l g \cdot \sin \theta_1 + f_r (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = -n K_t u \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} & [m_1 r l \cdot \cos(\theta_1 + \alpha) - n^2 J_m] \ddot{\theta}_1 \\ & + [(m_1 + m_2) r^2 + J_2 + n^2 J_m] \ddot{\theta}_2 \\ & - m_1 r l \cdot \sin(\theta_1 + \alpha) \dot{\theta}_1^2 + (m_1 + m_2) \\ & \times r g \cdot \sin \alpha + f_r (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) = n K_t u \end{aligned} \quad (4.68)$$

式中, θ_1 为倒立摆车体的倾斜角(rad); θ_2 为车轮的转角(rad); m_1 为倒立摆车体的质量(kg); m_2 为车轮的质量(kg); J_1 为倒立摆车体的惯性矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); J_2 为车轮惯性矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); l 为车轴与倒立摆车体重心之间的距离(m); r 为车轮半径(m); α 为斜面的倾斜角(rad); f_r 为驱动系统的阻力($\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$); J_m 为电机转子的惯性矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); k_t 为电机额定转矩($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$); n 为减速比。

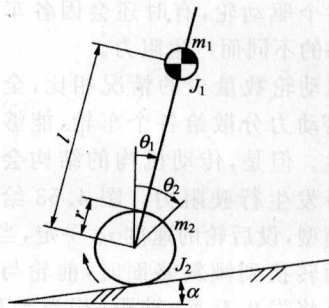


图 4.56 车轮型倒立摆的模型

市川 诚

4.1.6 动力学

如果机器人移动的运动速度限于比较小

的范围内,那么就可以从静态力平衡的角度来研究运动。如果移动速度提高了,高至机构惯性力的比例不能忽略,那么就必须根据运动方程式进行分析。一般来说,机器人移动机构的移动速度都比较低,根据运动方程式进行运动力学分析的例子较少。将其换成汽车,由于它的移动速度十分快,因此动力学分析不可缺少。运动性能研究的内容包括稳定圆旋转特性、动态稳定性、转向控制特性、抗干扰运动特性等。下面简要叙述相关内容。

为了分析移动体的运动,首先必须建立适当的坐标系。当研究稳定圆旋转特性或干扰作用下的响应特性时,由于不必以移动轨迹本身作为分析对象,利用固定在移动机构上的移动坐标系来分析运动是比较方便的。图 4.57 给出移动机构和坐标系。在图 4.57 中,设移动机构的轴与移动方向的夹角(横向滑动角)为 β ,移动机构绕铅垂轴的角速度为 γ ,运动方程式即为 β 和 γ 的一阶微分联立方程。与惯性力等效的力、力矩是由车轮悬挂装置产生的约束,以及来自移动路面的、对车轮施加的力。

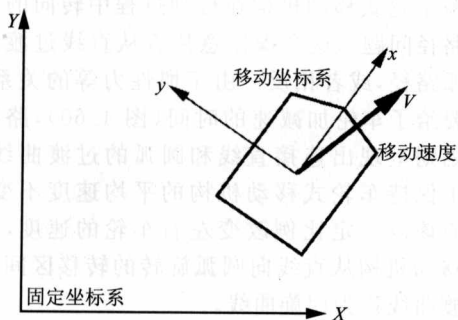


图 4.57 移动机构的运动和坐标系

如果打算针对轨迹的跟踪特性,或者运动产生的移动轨迹来进行分析,则必须建立固定坐标系。虽然通过将力、力矩等效为惯性力等的处理手法,不会改变它们在固定坐标系中的作用,但是通过车轮来描述受力比较复杂。因此,为了简化问题,一般都假定移动速度不变、转向角小、移动方向与车体轴的夹角小等条件,以简化的形式来进行分析。

利用仿真,在尽量接近设备实际状态的条件下来研究系统控制的响应时,一般不进行上述近似处理,而是尽量按符合现实移动机

构的情况来建模,利用数值积分求解运动。例如,给车轮、车体等每个相互运动要素建立变量,考虑它们之间的作用与反作用来建立运动方程式。求解运动方程式比较容易的途径是先求移动体整体的能量,然后计算拉格朗日函数,再对各个变量进行微分来计算运动方程式。

小森谷 清

4.1.7 控制

1. 控制基础

1) 控制系统

车轮式移动机构的控制系统可以考虑采用分层结构(图 4.58),它由零部件级(与车轮、转向机构驱动器、传感器等一一对应的装置)、功能级(完成控制任务,实现与移动有关的各个装置给定的功能)、协调级(在更上一级解释控制命令,控制系统)组成。

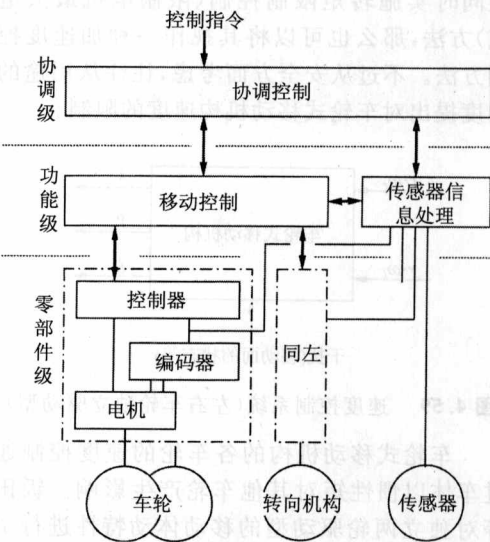


图 4.58 控制系统的分层结构举例

车轮式移动机构的控制方法有两种:一种是由操作员实施远程操作;另一种根据预先给定的程序和数据让移动按照程序来运行。至于说自律移动,目前正在开展这方面的研究,在结构化的车间里,因为已经很有基础了,就比较方便像 AGV 这样的车轮式移动机构运行,但在多数环境中尚不具备这样的条件。

2) 机构控制

车轮式移动机构控制的操作量有两种:一种是对车轮驱动的操作量;另一种是若采

用转向机构,那么就是对转向驱动的操作量。各个控制量为位置量和速度量,只要在平移和旋转模式中没有停顿,就必须同步实施对各个驱动轴的控制,而且基本上采用速度控制。

(1) 速度控制及加速度控制 在非完整车轮式移动机构的控制中,无法用表示位置的变量 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $\theta(t)$ 直接表示目标值,必须按照速度控制系统以 $\dot{x}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $\dot{\theta}(t)$ 进行处理。

我们以图 4.59 所示的独立两轮驱动型为例来考察影响速度控制的要素,这些要素除了移动路面的凹凸不平 and 摩擦系数外,还有车轮式移动机构本身的惯性等。另外,在有关力学的小节中曾经讲过,车轮式移动机构的加速度不但受驱动力裕度和非滑动(受摩擦系数制约)的制约,还受车轮式移动机构本身加减速时姿态稳定性的制约。实施速度控制时,如果还同时实施转矩限制控制(限制电机最大电流)方法,那么也可以将其视作一种加速度控制方法。不过从安全方面考虑,往往从用途的角度提出对车轮式移动机构速度的限制。

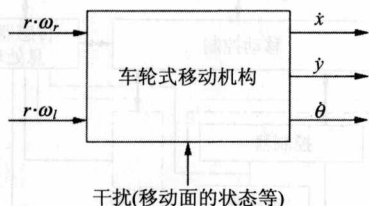


图 4.59 速度控制系统(左右车轮独立驱动型)

车轮式移动机构的各车轮的速度控制通过车体以惯性矩对其他车轮产生影响。饭田等对独立两轮驱动型的移动体运动特性进行了分析,采用具有 FF 补偿器的驱动轮速度控制器进行了研究。另外,在速度控制中虽然一般采用 PI 控制,但也与这样的控制的响应特性相关。

关于转速检测,如果是模拟信号可以采用测速发电机得到,但是我们可以将来自用于位置控制的编码器的脉冲通过 F/V 变换器得到速度信号,或者计单位时间的脉冲数而得到速度信号,因此可以省略测速发电机。

(2) 转矩控制 例如,在直流电机的速度控制中,为了在行驶载荷变化的条件下将速度保持一定,可以采用先检测速度再控制电

机施加电压的反馈控制。如果行驶载荷变动比较小,上述控制不存在问题。但是如果环境造成行驶阻力急剧变化,有时控制无法满足瞬时跟踪的要求,例如行驶载荷突然变小,车轮转速立即升高,产生超调(飞车)等现象。在这样的环境条件下,转矩控制(控制电流)往往容易满足稳定行驶的要求。

车轮式移动机构的行驶阻力随移动环境的变化呈现很大的起伏。一般,行驶开始时需要较大的转矩来克服起动阻力,起动后剩余的转矩用于加速。然后,当以一定速度行驶时,为了避免能量的无谓消耗,必须在保持速度为一定的范围内抑制电流。另外,在摩擦系数低的移动路面上,为了防止滑动,必须以低转矩起动,还需要实施转矩限制控制,以便防止加速度过大。说到转矩控制,其实它包含多种方法,例如以设定转矩进行控制的恒转矩控制、薄板卷绕辊的张力控制(控制对象的量变与电机转矩有一定关系的转矩控制)等。实施转矩控制时,为了防止因车轮突然卸载而导致转速急剧上升,还必须进行限速控制等。

(3) 转向控制 我们来考察独立两轮驱动型车轮式移动机构在行驶过程中转向的行驶路径问题。这个操作意味着从直线过渡到圆弧路径,或者相反。由于惯性力等的关系,需要给予车轮加减速的时间(图 4.60),路径规划则呈现出连接直线和圆弧的过渡曲线。为了保持车轮式移动机构的平均速度不变,就应该以一定比例改变左右车轮的速度,这样移动机构从直线向圆弧旋转的转移区间的过渡曲线称为回旋曲线。

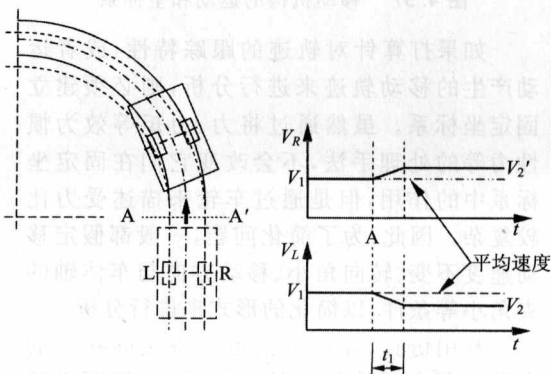


图 4.60 过渡曲线举例

如果机构中带有转向轴,那么上述过渡曲线就是实现转向角的位置控制的结果,以满足旋转半径的给定目标值,但是与独立两轮驱动型相同,为了得到规定的轨迹,应该对转向轴实施速度控制,以保持与驱动轮速度的同步关系。转向控制的转向角传感器可以用差动变压器或电位器(模拟电压检测),或者用旋转编码器(数字信号)。此外,还采用检测转向角 0° (原点)以及检测左右转向角极限值的开关。如果采用了绝对型编码器,可以省去原点检测用的开关。为了防止左右转向角超出极限值,应该安装机械挡板。

实现上述转向控制的前提是车轮式移动机构的转向轴能够实施连续位置控制,如果独立两轮驱动型车轮式移动机构的结构特点是通过机械方式事先调整好直线前进的转向角和自旋旋转的转向角,并走走停停地切换这两种行驶模式的转向角,则问题就被简化为2位置控制。这样的机构既能适应移动路面的凹凸起伏,又能分散载荷,如果在前后安装与驱动轮相同直径的车轮,就可以用来减少自旋旋转时发生的行驶阻力。

2. 导航

导航是一种使移动物体正确到达目的地的方法。导航技术是随着舰船、飞机的应用而发展起来的。航空领域有多种导航的方法,如以自然界为基准进行测位导航的方法(推测导航、地标导航、天体导航等),后来又发展成为无线导航(接收地面无线设备的支持)、自主导航(靠飞机本身装备的设备)、利用人造卫星的卫星导航(GPS)等。

为了实现导航,必须解决路径设计(到达目的地的路径)、当前位置的估计、沿路径移动的轨道控制等问题。路径规划是指按照在大范围内描述环境的环境模型(地图),选定从当前位置到目的地的路径子目标,再根据移动机构的运动学特性,将直线、圆弧、回旋曲线等过渡曲线组合起来,构成相邻子目标之间移动的局部路径。前者不一定与移动机构有关。详细内容可以参阅本书第5篇的自律移动技术。

1) 局部路径设计

无全方位移动功能的一般车轮式移动机构,当它以某个转向角行驶时,将描绘出与转

向角对应的某个曲率的圆弧轨迹。因此,借助于直线、圆弧、过渡曲线来实现路径设计和轨道控制,应该还是比较容易的。

2) 位置估计

位置估计是指根据正运动学得到车体的运动速度,并将它积分的方法,这是最基本的估计移动体位置的方式。当然还有其他方式。一种是利用惯性传感器,相对于惯性坐标系求出平移加速度及旋转角速度,再通过积分运算推算出位置。这种方式借助于移动体内固定的内传感器来测量运动状态,完成位置估计。与此相对,还可以借助于移动体上固定的外传感器,观测周围环境状态,提取特征性部分,然后根据预先给定的自身位置信息来推算位置。还有一种方式是采用外部辅助装置,接受特地环境中安排的信号源(如路标)的信息,根据三角测量完成位置的估计。

(1) 利用正运动学 如前面所述,移动机器人的正运动学基本公式并非给出了空间位移,而是给出了速度之间的关系,因此正运动学无法直接用作轨道控制的反馈信息,或者说其无法直接用作观测环境的基准位置。为了能满足这些用途,正如前面有关典型机构模型正运动学的内容所介绍的,必须对正运动学得到的本体平移速度和旋转角速度进行积分。积分的结果代表从初始位置起计算的移动量估计值。

对车轮式移动机构旋转轴的测量,可以依靠旋转编码器等内传感器。所谓测距法是指测量沿移动轨迹行进的移动距离,而推算移动轨迹本身,则称为位置估计法(dead reckoning)。

(2) 利用惯性传感器 这个方式类似于飞机飞行所使用的惯性导航装置,它是将加速度传感器和陀螺传感器组合起来来推算位置和姿态。测量角速度的陀螺传感器有很多种类,如机械式陀螺、振动陀螺、气体速率陀螺、激光陀螺、光纤陀螺等。

在利用正运动学做位置估计时,车轮型移动机构的车轮制造精度、载荷引起的车轮直径的变化、机构的组装精度、行驶路面的凹凸和倾斜等因素的影响,伴随着移动过程将产生位置和方向的累积误差。特别是方向误差随着移动距离的延长而显著增加,结果又

带来了大的位置误差。因此,有人提出一种改善的方法:移动距离靠车轮转速来测量,方位角靠组合无累积误差的磁方位传感器(绝对方位测定)与陀螺式罗盘来测量。

(3) 利用外传感器 外传感器的位置估计方法是指在地图或环境的已知位置上设定标记,移动机器人把它们作为对象物来进行检测,求出方向和距离,再根据标记与移动体在几何学上的关系,求出绝对位置。作为对象物体即标记,既可以选择易于识别的人为标记,也可以选择环境内现成的东西(如荧光灯或柱子等)。

在这种方式中有一种被称为被动地标方式,其特点是沿机器人行驶的路径,在地面或墙壁等处配置标记,一旦机器人通过该处,就能确定自己所处的当前位置。

借助于物品的已有特征进行位置估计对提高机器人的自律性往往很有帮助,具体的途径很多,如选用超声波距离传感器检测行驶路径左右的墙壁或地面的凹凸,用视觉传感器检测顶棚荧光灯或出风口等。

(4) 外部辅助方式 该方式像传统的指向标,在环境中配置主动发出信号的信号源,用传感器接收它们的信号,根据信号源的方向和位置,推算出移动物体的当前位置。充当指向标的途径很多,例如一种是测定三个光源或声源的方向,利用三角测量原理计算出位置。另一种是设置恒速旋转扫描的激光指向标,移动体一侧的3个受光器接收到激光后,就可以计算出指向标的方位。GPS则利用地球卫星轨道上的多颗卫星发出的电波来进行定位,若在室外环境下能在运动环境附近设置基准点,就能实现高精度的绝对位置测量。

3) 位置估计误差的评价

下面以图 4.34 独立两轮驱动型移动机构模型为例,对车轮型移动机构的位置估计方法的特点和误差估计方法加以说明^[36]。

首先,如图 4.34 所示,设两个车轮的圆周速度为 u_r 、 u_l ,车轮的间距为 l ,用二维平面的位置及姿势的三个参数 (x, y, θ) 来表示移动机器人的运动。对于微小时间 Δt ,可近似为

$$\Delta\theta = \frac{u_r - u_l}{l} \Delta t \quad (4.69)$$

$$\Delta x = \frac{u_r + u_l}{2} \cos\theta \cdot \Delta t \quad (4.70)$$

$$\Delta y = \frac{u_r + u_l}{2} \sin\theta \cdot \Delta t \quad (4.71)$$

将上述式子改写为离散时间系统表达式,则有

$$x_{k+1} = x_k + \frac{u_{rk} + u_{lk}}{2} \cos\theta_k \cdot \Delta t \quad (4.72)$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{u_{rk} + u_{lk}}{2} \sin\theta_k \cdot \Delta t \quad (4.73)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \frac{u_{rk} - u_{lk}}{l} \Delta t \quad (4.74)$$

若将系统的输入视为 u_{rk} 、 u_{lk} ,则系统可表现为

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k + v_k) + w_k \quad (4.75)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

$$u_k = \begin{bmatrix} u_{rk} \\ u_{lk} \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

式中, v_k 为车轮速度变动引起的误差成分的模型; w_k 为除此以外的系统误差模型。于是可以认为,机器人在运动中车轮半径的变动及轮胎着地点的滑动等误差是由车轮速度的变动引起的,车轮间隔 l 的变动则包含在系统误差里。

然后,根据式(4.75),建立状态向量差分的模型,如下式所示:

$$\begin{aligned} \Delta x_{k+1} &= \frac{\partial f_k}{\partial x_k} \Delta x_k + \frac{\partial f_k}{\partial u_k} v_k + w_k \\ &= A_k \Delta x_k + F_k v_k + w_k \end{aligned} \quad (4.78)$$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{u_r + u_l}{2} \sin\theta_k \\ 0 & 1 & \frac{u_r + u_l}{2} \cos\theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

$$F_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos\theta_k & \frac{1}{2} \cos\theta_k \\ \frac{1}{2} \sin\theta_k & \frac{1}{2} \sin\theta_k \\ \frac{1}{l} & -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

可利用下式对式(4.78)中所表示的系统状态向量的估计值及估计误差,即协方差矩阵的更新进行评价^[37,38]。式中, \hat{x} 为 x 的估计值。

$$\hat{x}_{k+1} = f_k(\hat{x}_k, u_k) \quad (4.81)$$

$$P_{k+1} = A_k P_k A_k^T + F_k V_k F_k^T + W_k \quad (4.82)$$

存在概率超过一定值后,状态向量的分布形状呈椭球体,若存在两个变量则呈椭圆状。例如,沿着子目标的列变化,给出两个轮的速度指令 u_r, u_l , 关于这时的移动机器人运动轨迹的仿真结果如图 4.61 所示。

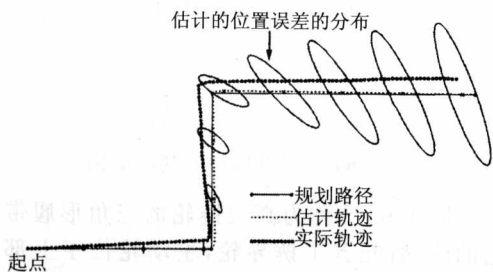


图 4.61 移动轨迹的位置估计误差仿真

由图 4.61 可知,表示移动机器人存在概率高于某个值的误差椭球体将随着移动距离的增大而增大。就是说,推测定位法具有随移动距离的增加,误差有扩大的倾向。

4) 位置估计误差的消除

根据正运动学的位置估计,或者利用惯性传感器的所谓基于内传感器的位置估计,累计误差都是不可避免的。为了在评价位置估计误差的同时将误差限制在允许值以内,需要从环境中得到绝对位置信息,并在适当时机消除位置估计误差。因此,在位置估计方法中,一般应该既采用基于内传感器的推测定位法,又借助于视觉传感器等其他能够检测环境信息的外传感器,来实现误差的消除。

如果采用地标来消除估计误差,实现位置估计的更新,那么传感器功能、地标类型和它与移动体的相对位置关系等因素都会影响到估计误差的分布形状和大小。基于上述考虑,消除误差时必须选择那些对消除误差有利的地标,并要更新误差椭圆。另外,如果从一个地点能够观测到多个地标,那么还应该评价通过各地标观测和更新而得到的误差分布,选择评价价值高的地标。

5) 轨迹控制

轨迹控制的基本问题是估计移动体的当前位置,检测移动体偏离目标跟踪路径的偏差量,决定移动控制量,并控制各个驱动自由度,使移动体始终沿路径行进。具有全方位移动功能(完整)的移动机构对跟踪移动路径

的适应性较强,而非全方位移动的车轮式移动机构,能跟踪的路径则受到限制。一旦给出满足移动机构运动学限制的路径后,只要编写出消除路径误差的车体平移速度及旋转角速度的算法,再利用逆运动学求解驱动自由度所需要的目标值,就可以实现轨迹控制了。图 4.62 为实现轨迹控制系统的构成。

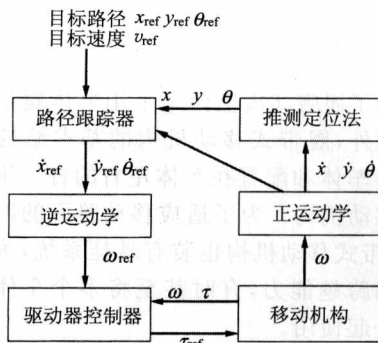


图 4.62 轨迹控制系统的构成

如果是具有全方位移动功能的移动体,那么它能比较自由地设定路径跟踪算法。如果是属于不具有全方位移动功能的一般移动机构,则必须考虑路径的形状和机器人对路径的相对位置来决定算法。以图 4.63 为例,让独立两轮驱动型移动机构跟踪直线路径,如果路径位于车体(移动体中心轴)前方一定距离,选择车体的旋转角速度作为控制变量,就能将车体与路径的距离误差调节为零。

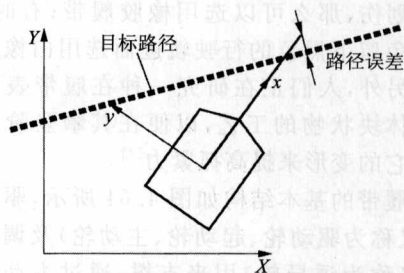


图 4.63 对直线路径的跟踪

小森谷 清

4.2 履带式移动机构

履带式移动机构所使用的履带(crawler, track)属于一种循环轨道(endless track),它采取沿车轮前进方向边铺设移动面边移动的方式。为了避免农用机械或施工机械的车轮

陷入柔软的地面里,1904年美国的本杰明·霍尔特首次车轮与车轮之间铺设履带,以降低其着地压强,并将这种机构制成产品。履带另外具有的特点是,因为履带长,能够越过车轮无法通过的壕沟,因此在农林业、建筑、军用等各种领域得到广泛的应用。在移动机器人领域,履带的应用主要集中在有台阶等障碍物的空间中移动的机构。

4.2.1 构造

除了履带式雪上汽车采用单体履带推进车体之外,履带式移动机构的基本结构一般都是由车体和配置在车体左右的各一组履带组成驱动机构。为了适应移动路面的凹凸不平,履带式移动机构也装有悬挂系统,为了提高它的跨越能力,有时甚至将多个车体连接起来一起使用。

1. 履带机构^[1]

履带机构一般由履带、支撑履带的链轮、滚轮以及承载这些零部件的行驶框架(也称为支撑滚轮框架)构成。最后再将行驶框架安装在车体上。

为了适应不同强度和性质的行驶路面,人们设计了各种各样的履带。例如,为了降低在软地基上的着地压强,有宽度较宽的履带;在倾斜地面和那些需要大牵引力的场合,有周边带叫做履带板的突起状履带,以便利用土地的剪切强度;如果移动路面不希望被履带划伤,那么可以选用橡胶履带;有时,为了避免留下黑色的行驶轨迹而选用白橡胶履带。另外,人们正在研究一种在履带表面封入粉体块状物的工艺,以便在其攀登阶梯时借助它的变形来提高抓紧力^[2]。

履带的基本结构如图4.64所示,驱动链轮(又称为驱动轮、起动轮、主动轮)及调节链轮(又称为诱导轮)用来支撑,通过主动轮的旋转驱动,在它们之间进行循环。下部滚轮的作用是减少履带下部着地压强的不均匀性,上部滚轮的作用是限制履带的下垂。诱导轮通过弹簧等安装在行驶框架上,避免行驶过程中产生的各种冲击和进入履带与滚轮之间的异物所造成的过大张力直接施加到履带上,有时履带式移动机构还安装了张力调整装置。

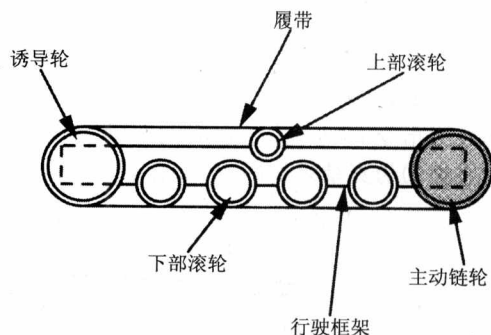


图 4.64 履带机构的基本结构

图4.65为称为高位链轮的三角形履带,它的前、后配置了诱导轮,主动轮位于上部,该结构的优点是可以减少履带对驱动机构所造成的行驶冲击。

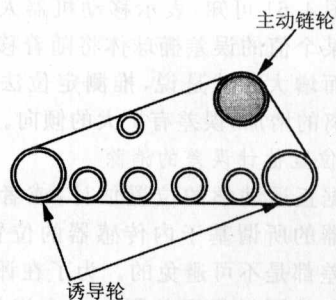


图 4.65 高位链轮的履带结构

图4.66所示为军用车辆支撑履带的各轮配置。为了提高爬越台阶的能力,履带有一个冲角(attack angle)和退角(departure angle)。

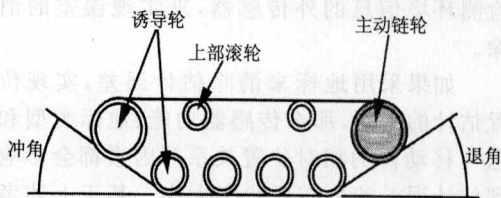


图 4.66 军用车辆的履带机构

2. 悬挂机构^[3]

如果是小型履带式移动机构,在多数情况下,车体与左右履带的位置关系是固定的。但如果是大型机构,一般都安装有悬挂机构,因为行驶在不平整地面上时,若单侧履带呈一点着地状态,将对机构部分施加过大的外力,或者造成姿态的不稳定,悬挂机构有助于避免这种情况的发生。悬挂机构如图4.67所示,用轴支撑左右行驶框架的一端,用平衡梁

支撑另一端,形成允许摇动的机构。另外,还有其他的设计形式,如利用将两个下部滚轮作为一组负重轮来跟踪不平整地面,或者对于行驶面接触的链轮或滚轮安装悬浮装置等。

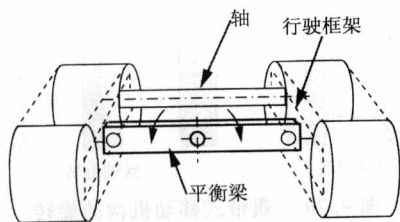


图 4.67 悬挂机构举例

3. 采用履带的各种移动机构

人们研究开发的各种履带式移动机构如图 4.68 所示^[4],或者改变履带本身的形状,或者将多个履带组合使用。

图 4.68(a)的可变形状履带方式通过对履带装入行星轮达到改变履带着地长度的目

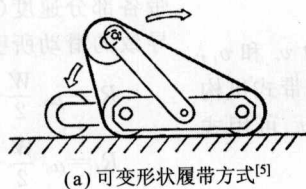
的,以便调节冲角^[5]。

图 4.68(b)的半月形履带方式利用履带形成大直径车轮的下半部分,能够兼顾低重心和改善台阶爬越性能的两个方面的要求。也可以通过改变轴距来提高斜面稳定性,另外还可以装入转向机构,像汽车那样转向^[6]。

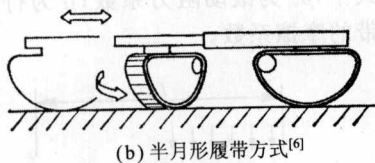
图 4.68(c)的辅助履带方式利用辅助履带调节冲角,从而提高其台阶爬越的能力,或者改变车体的姿态^[7]。

有的结构设计是在车体上安装履带,这样履带本身就能够像手臂那样旋转,从而提高了它对不平整地面的适应性。图 4.68(d)的 4 履带方式在车体前、后配置 4 组履带单元,分别控制各个履带单元,就能够控制车体姿态,或者能够像脚那样跨越障碍物^[8]。图 4.68(e)的 6 履带方式^[9]在车体左、右配置固定履带,再在前、后配置 4 组履带单元,它也具有与图 4.68(d)的 4 履带方式相同的功能。

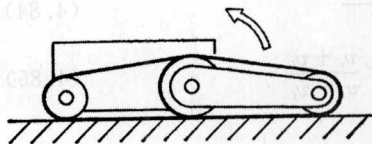
图 4.68(f)的中间折叠方式能让履带单



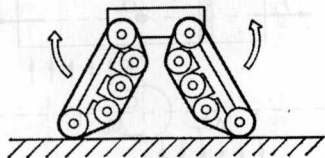
(a) 可变形状履带方式^[5]



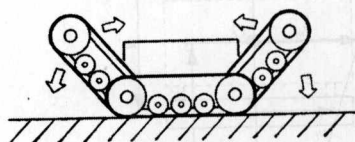
(b) 半月形履带方式^[6]



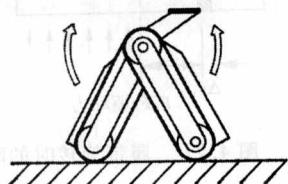
(c) 辅助履带方式^[7]



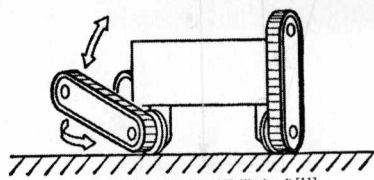
(d) 4履带方式^[8]



(e) 6履带方式^[9]



(f) 中间折叠方式^[10]



(g) 带转向的4履带方式^[11]

图 4.68 履带组合行驶系统

元的旋转轴绕公共轴旋转,控制张开的角度,并调整安装在公共轴上的承载台的倾斜,通过两类动作的组合,可以调整安装在承载台上的设备重心^[10]。

图 4.68(g)的带转向的 4 履带方式在履带单元和车体的安装部分上附加转向机构,在该设计中将履带主动轮与车轮并列,将履带升起,改用了车轮就可以满足高速行驶的要求^[11]。

4.2.2 基础知识

1. 平均着地压强^[12]

履带式移动机构的平均着地压强如式(4.83)所示,计算时假定车辆重量平均分布在着地面上。由图 4.64 可知,很难做到载荷分布完全均匀,实际上,位于诱导轮、主动链轮和下部滚轮的正下方的载荷较大。

$$p = \frac{W}{2bL} \quad (4.83)$$

式中, W 为车辆重量; b 为履带宽度, L 为着地长度。

2. 旋转半径

在图 4.69 中设各履带的速度为 v_r 和 v_l , 履带的间隔(履带中心距)为 B , 则履带式机构的理论旋转半径 r_m 、中心旋转速度 v_m 可用式(4.84)及式(4.85)表示

$$v_m = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (4.84)$$

$$r_m = \frac{B}{2} \times \frac{v_r + v_l}{v_r - v_l} \quad (4.85)$$

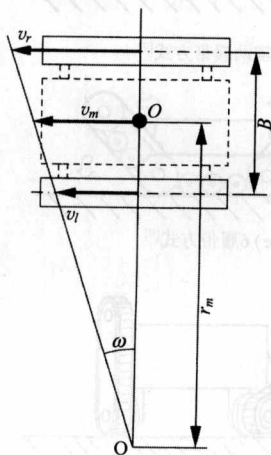


图 4.69 履带式移动机构的旋转

如图 4.70 所示,将左右履带反向驱动所

得到的旋转称为自旋旋转(特别是在履带驱动中称为超原地旋转),将在停止单边履带的条件下所得到的旋转称为枢轴旋转(同样也称为原地旋转)。

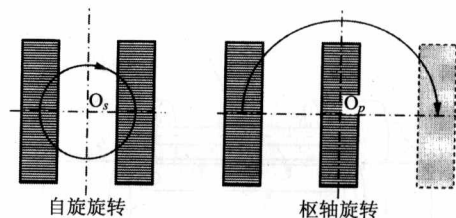


图 4.70 履带式移动机构的旋转

3. 行驶阻力

与车轮式移动机构的行驶阻力相同,履带式移动机构的行驶阻力也为平移阻力与旋转阻力之和。在通常的两履带式行驶系统中,若设车辆重量为 W , 则左、右履带的阻力 R_r 、 R_l 一般可用式(4.86)表示。式中相当于旋转阻力的第二项 $\mu WL/4B$, 如图 4.71 所示, 是履带本身的速度、旋转中心的角速度与履带各部分速度(由旋转中心的距离决定)之差导致的滑动所引起的^[12]。

$$\left. \begin{aligned} R_r &= \mu_0 \frac{W}{2} + \frac{\mu WL}{4B} \\ R_l &= \mu_0 \frac{W}{2} - \frac{\mu WL}{4B} \end{aligned} \right\} \quad (4.86)$$

式中, μ_0 为滚动阻力系数; μ 为行驶路面与履带的摩擦系数。

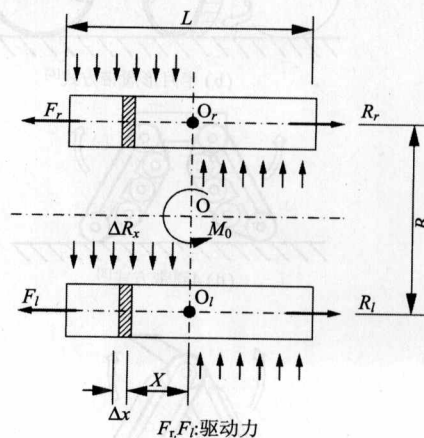


图 4.71 履带旋转时的阻力

履带的行驶阻力由履带与行驶路面的相互作用产生的阻力、驱动履带的内部机械阻力两个部分构成。后者含履带连杆轴的阻

力、橡胶履带的弯曲阻力、诱导轮轴和各个滚轮轴的阻力、下部滚轮在履带上移动时的滚动阻力、上部滚轮与履带的摩擦阻力,以及将这些零部件加速时的加速阻力等,而且这些阻力还随着履带张力的变化而改变。因此,在进行履带机构的设计时,必须考虑到上述内部阻力和旋转阻力,要留有一定的余量。

〔土地路面上行驶〕以 M. G. Bekker 早期的研究为基础,现在人们取得了不少有关土地路面上行驶时的研究成果^[13]。

如式(4.87)所示,车辆的有效牵引力 DP 定义为从车辆推进力 H 减去行驶阻力 R 的值。与土地路面接触而产生的阻力则由两个部分的阻力构成:一部分阻力是将履带前端所接触的土向前推压而形成的推土阻力;另一部分阻力是与车辆自重将履带下的土压实所需要的功对应的压实阻力。详细情况参阅土质机械学的文献[14]等。

$$DP = H - R$$

(4.87)

市川 诚

4.3 双足移动机器人的机构和控制

4.3.1 双足机器人的机构

在本节中叙述用两条腿来移动的机器人(以下称为双足机器人:biped robot)的机构。除了人类利用双足移动以外,鸟类也采取双足移动的形式,可见随目标功能的不同,双足移动机构有很大的选择余地。如果仅仅有双足就足够的话,那么可伸缩的移动关节型腿脚(telescopic leg)大概是最简单的机构了。但是,研究双足机器人的目的往往旨在阐明人类或动物的移动机理,或者旨在让双足移动机构能够满足人类居住的环境下实用化的要求,因此在本节中主要采用模仿人类腿脚的旋转关节型腿脚(articulated leg)机构。

设计双足机器人的第一步,首先是根据目标规格决定自由度的构成;与此同时,决定主动关节(active joint)的驱动方式,选定驱动器;然后,选定各种传感器。以下按顺序来叙述这些内容。

1. 自由度构成

本小节说明踝关节以上的腿部机构。关于踝关节以下的脚掌部分将在本节 3. 中加以叙述。

双足机器人的腿脚机构与机械手相同,一般由单自由度的旋转关节的多杆件机构组成。若将踝关节、髌关节作为 3 个自由度的球面关节,将膝关节作为单自由度的旋转关节,那么人腿部的模型如图 4.72 所示。即对于单腿而言,髌关节相当于纵摇轴、横摇轴、偏转轴的 3 个自由度,膝关节相当于纵摇轴的单自由度,踝关节相当于纵摇轴、横摇轴和偏转轴的 3 个自由度,这样两条腿就是共计 14 个自由度的左右对称的串联连杆机构。

不过,最近人们在双足机器人的腿脚机构中最常采用如图 4.73 所示的自由度配置,即髌关节有偏转轴、横摇轴、纵摇轴的 3 个自由度,膝关节有纵摇轴的单自由度,而踝关节有纵摇轴、横摇轴的 2 个自由度,这样单腿就有 6 个自由度,两腿共计由 12 个自由度构成^[1,2]。实际上,为了控制脚掌的位置和姿态的共计 6 个坐标,给出 6 个主动自由度数就足够了。同样是 6 个自由度,还有另外一种构型,如图 4.74 所示,其特点是可以拓宽可动角度^[3]。

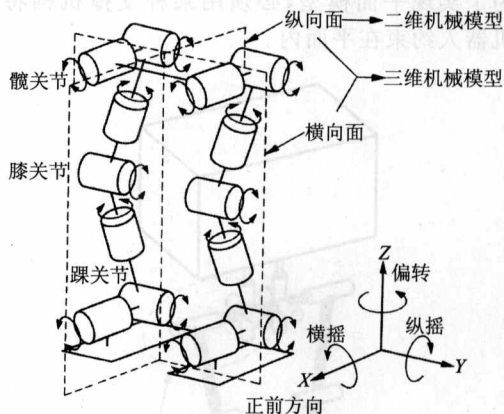


图 4.72 单腿 7 个自由度构成的双足机器人

如图 4.72 所示,在路面上设定 X 、 Y 、 Z 的 3 轴直角坐标系作为最基本的绝对坐标系。 X 轴正对读者的前方, Z 轴为铅垂方向,而 XY 平面与路面(水平面)一致。这时,将 XZ 平面称为纵向面(sagittal plane),将 YZ 平面称为横向面(lateral plane 或 frontal plane)。

然后,通常还要设定作为控制用的局部坐标系。但是,与一般的机械手不同的是,由于双足机器人不存在空间中固定的基座构件,几何学和力学约束条件随时随刻都在发

生变化,因此关键是要选择容易处理的坐标系。详细情况的介绍请参考以下各节。

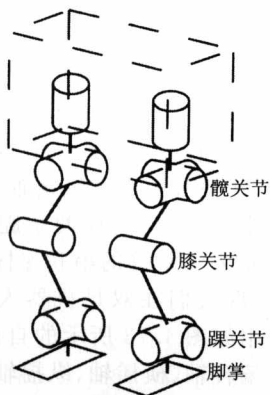


图 4.73 单腿 6 个自由度构成的双足机器人

现在有两种双足机器人的模型:一种是在纵向面上运动的平面模型(planar model);另一种是在三维空间内移动的三维模型(3D model)。与三维模型相比,平面模型的自由度较少,因此用数学处理起来相对简单,经常用其来充当研究控制律的原型模型。但是,为了实现平面模型,必须用某种支撑机构将机器人约束在平面内。

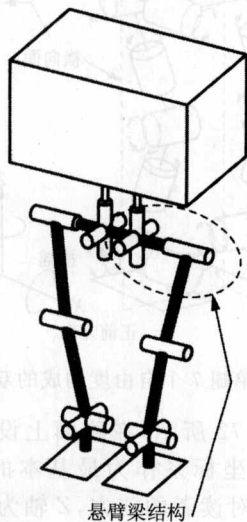


图 4.74 能拓宽可动角度的自由度配置

2. 驱动方式

随着关节驱动方式的不同,双足机器人的机构有很大的差别。经常采用旋转电机来驱动关节,但如果安排自由度的顺序不同,安装电机的位置也就随之发生变化。因此,在

多数设计中,自由度构成和驱动方式的确定是同步进行的。

首先介绍伺服电机驱动单自由度关节的方法。市场销售的高性能(功率重量比大)的伺服电机一般都是属于低转矩、高转速型的,因此为了得到希望的输出特性,必须进行适当的减速。但是,电机和齿轮的质量在双足机器人本体的质量中,占有非常大的比例,因此它们的配置方法就显得特别重要,它们还将直接影响腿脚机构的变化。

最简单的设计是将电机、齿轮直接与关节轴连接,如果是这样的话,它们最好尽量配置在腿脚的根部。这是因为将占有相当重量比例的电机向根部移动,会减小围绕髋关节的惯性矩,达到增加整个腿脚机动性的效果。图 4.75 所示为体现上述设计思想的典型驱动方式。

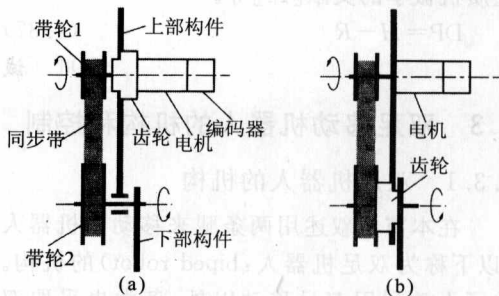


图 4.75 电机与齿轮的配置方法

图 4.75(a)的方式是将电机和齿轮两者直接连接后配置在关节的上方的驱动关节。图 4.75(b)的方式是将齿轮配置在关节上,而驱动它的电机则配置在上方。由于都采用了同步带,因此能够通过改变带轮的模数来调整齿数比。

在图 4.75(a)的方式中,由于将齿轮配置在上部,因此其惯性矩小,这是它的优点,但其缺点是同步带产生的挠曲将直接影响关节角的受力状态,因此该方式不适合精密定位。另外,由于同步带直接承受关节的负载,因此必须满足大转矩的要求。

在图 4.75(b)的方式中,齿轮与关节直接相连,因此齿轮应该承受较大的负载。这样,显然在惯性矩方面它不如图 4.75(a)的方式,但由于同步带的挠曲通过齿轮后减弱,因此它对关节角施加的影响会比较少。如果齿轮

传动选择的是谐波驱动减速器,那么由于一级减速即可达到大减速比,从总体上来说,电机和齿轮的总重量比较小。

上述例子给出了在双足机器人机构中标准的驱动方式。此外还有一种方法,是利用多个驱动器驱动具有若干个自由度的被动关节(passive joint),以代替采用单自由度的主动关节。

例如,人们曾经尝试将踝关节或髌关节作为球面关节,从外侧通过几条钢丝对它进行驱动。既然用到钢丝,就允许将驱动器配置在根部,这样可以减轻整个腿部的质量。反过来,它的缺点是给控制带来问题,即处理钢丝绳的弹性和带轮的摩擦是相当麻烦的事情。

选用电机驱动的首要问题在于如何设法使结构发挥出最大的功率输出。大功率输出的首选方式仍然是液压驱动方式。液压驱动器有移动型(液压缸)、旋转型(液压马达)等。这两种驱动器的输出功率的大小取决于工作介质的压力、缸体直径(或叶片面积)、控制阀的开口面积等。

液压驱动方式的优点是输出功率大,除此以外的优点还有不需要传递机构(齿轮等),以及由于工作液体、液压软管的可压缩性,它承受机械冲击和损伤的能力很强等。但是,由于油的黏性随着油温的变化而变化,驱动器内部的摩擦增大,因此在实施精密的力控制时,必须考虑这些因素对控制器的影响。在双足机器人上采用液压驱动方式最大的问题在于是否能够安装液压泵。

3. 脚掌机构

脚掌所起的一个作用是使踝关节的驱动器能够围绕着地点产生转矩。这个围绕着地点的转矩对于双足机器人的控制具有非常重要的意义。脚掌的另一个作用在于确保机器人与地面有良好的接触状态。这是由于行进中脚掌必须适当地紧贴地面,以得到足够的摩擦力,从而由地面获得反力向前行进。

脚掌机构如图 4.76 所示,它有各种设计形式。图 4.76(a)所示的是简单地由一块板构成的脚掌,图 4.76(b)在两块板之间夹入橡胶等具有被动自由度的脚掌,而图 4.76(c)的

脚掌具有脚趾关节。

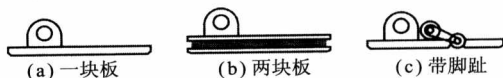


图 4.76 脚掌机构

有无脚掌,或者采用什么样的脚掌将完全取决于运动控制方式的要求。如后面所叙述的,如果对踝关节采取柔顺控制,即控制关节的刚性使关节刚性降低时,像图 4.76(a)那样简单的形状就足够了。很好理解,此时将踝关节驱动器的转矩设为零即可。在这种情况下,脚掌不是为了产生踝关节转矩,它只是具有扩大着地面积的作用。

但是,如果必须对踝关节进行高刚性的位置控制,或者由于驱动方式的原因而无法降低为低刚性时,图 4.76(a)的脚掌就不合适了。理由是在着地时受到的冲击或地面起伏等引起的干扰,会使脚掌在地面上打滑或引起震颤(chattering),它们对机器人的稳定性将造成不良影响。

为了解决这一问题,只要如图 4.76(b)所示,将脚掌改成双重结构即可,即让连接踝关节的部分和接触地面的部分彼此产生相对运动。究竟如何产生相对运动,则取决于插入上、下两个构件之间的被动环节(弹簧或减震器)的特性。这样,定位误差就能够被最后一级被动自由度所吸收。

效果还不仅是这些。例如,为了使脚掌能适应不平整路面行走,需要对踝关节实施柔顺控制,此时,由于双重脚掌本身的被动柔顺性减小了开环增益,还能收到提高控制性能的效果^[4]。

图 4.76(c)安装了脚趾,其意义在于脚趾的转矩能够对 ZMP(后述)的位置作微调,或者能完成“踢”的动作,或者能扩大步幅。但是,若为了脚趾的驱动而在脚掌上配置大的驱动器,则整个腿脚的惯性矩将会增加,这一点必须注意。

还有一种所谓的高跷型机构,它有意地丢掉了脚掌(因而也就丢掉了踝关节),而使腿脚与地面呈点接触状态^[5]。高跷机构属于理想的点着地,围绕着地点的转矩为零。由于某些自由度无直接受控的驱动器,因而有时称之为欠驱动模型(under-actuated model)。

采用高跷机构模型的主要理由是,人类或动物即使有脚掌,因为其长度有限,能够产生的转矩也是有限的。所以,从积极意义上来说,去掉脚掌能使踝关节的转矩为零,从而推导出对行走更有意义的上躯体动力学控制律。

与此相反,我们注意到,有一种玩具的脚掌特别长。这样的脚掌电机能够围绕着陆地点输出最大的转矩。因此,对这样的模型几乎无须进行稳定控制。

4. 传感器

在双足机器人中,最重要的控制任务就是姿态的稳定性控制,即防止它摔倒。为此,所需要的相关传感器信息有关节角度、绝对姿态、脚掌的着地姿态等。

最常用的关节角度传感器是电位器或光学式旋转编码器。特别是编码器,在很多场合它们在出售时已经与伺服电机直接连接在一起。利用编码器能得到分辨率非常高的关节角度信息。

分辨率高的原因在于通常电机前端安装有齿轮,测量出电机的旋转角度,用该值乘以齿数比,即为关节角度,结果如图 4.77 所示,关节角度的分辨率与齿数比成倍数关系。不过,由于齿轮等传动机构一般存在间隙,因此如果要求检测包含间隙在内的正确的关节角度时,采用与关节轴直接连接的角度传感器更为合理。如果有可能,同时使用两者则最为理想。

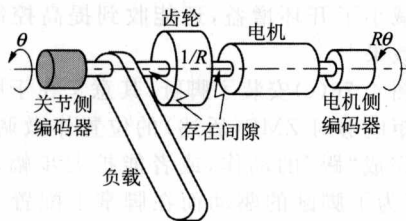


图 4.77 关节角度的测量

绝对姿态是对机器人稳定性具有非常重要的作用的传感器信息。虽然垂直陀螺仪是能够提供绝对姿态的高性能传感器,但它也有缺点,因为动态特性能达到实用程度的垂直陀螺仪的价格非常贵,而且其体积也非常大。

若是在平地,则还有一种方法,即可在小

腿部分安放角度传感器来代替陀螺传感器检测它与地面的相对角度,间接计算出姿态,但如果在不平整的地面上,该方法就不适用。

鉴于此,双足机器人一般采用动态特性好、小巧轻型的速率陀螺。速率陀螺安放在机器人的躯体上,测量出角速度(姿态变化率)后,通过滤波器进行时间积分,从而得到姿态角。

陀螺的缺点是存在低频分量漂移,长时间使用,角度信息将产生积累误差。所以,为了校正该误差(除去偏置),通常同时将倾斜角传感器作为辅助传感器。

在速率陀螺中,除了所谓的惯性陀螺,即机械式陀螺以外,还有利用光折射原理的光纤陀螺、利用气流的气体速率陀螺、利用音叉状振子的振动陀螺等,它们各自具有优缺点。

测量机器人着地状态的典型方法是在脚底安装限位开关,其做法很简单,仅检测有无着地发生即可。另一种方法如图 4.78 所示,在踝关节处安装 6 轴力觉传感器,或者将力传感器或压敏导电性橡胶等分布在整个脚掌上,以测定力或转矩。还有一种方法如图 4.79 所示,用位移传感器同时测定脚掌的倾斜和下沉^[6]。

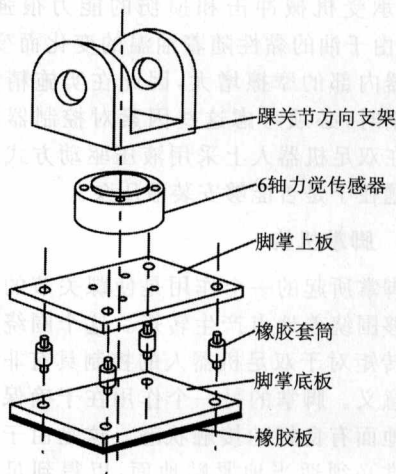


图 4.78 利用 6 轴力觉传感器测量着地状态

以上介绍了双足机器人所用的主要传感器,除此以外,如果想正确地控制关节转矩,那么就必须使用转矩传感器。

在采用电机进行驱动时,人们往往测量输出电流,将它乘以转矩常数,大致计算出输

出转矩。但是在多数情况下,这种方法无法给出正确的输出转矩值,因为电机内部和传动机构的特性属于非线性。

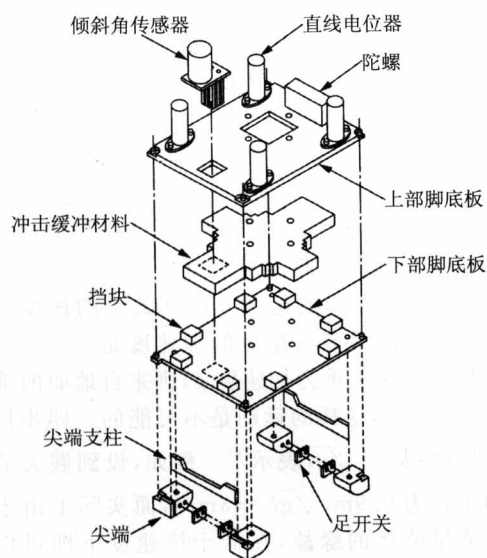


图 4.79 位移传感器和倾斜角传感器测量着地状态

液压驱动方式的情况下也类似。假设无摩擦,则测量容器内部的压力后就能够计算出输出转矩来,但是实际上,缸体内部也存在着复杂的非线性摩擦,因此要准确地推算转矩很难。

综上所述,最理想的测量关节转矩的方法还是利用与关节轴直接连接的转矩传感器。如果关节采用钢丝绳驱动方式,那么应该利用应变片测量出控制钢丝绳的张力,然后再计算转矩。可以预测,立体摄像头将成为今后越来越重要的传感器。在实时路径规划、路径跟踪以及不平整路面上的自适应步行方面它都将发挥重要作用。立体摄像头还可以与陀螺配合使用,实现高精度姿态测量。事实上,近年来与双足步行机器人有关的传感器技术的进步非常惊人,人们期待今后出现能适用于双足机器人的低价格传感器模块。

5. 特殊机构

人类或动物的关节是依靠两个以上的颌颞肌(antagonistic muscle)驱动的。改变颌颞肌的张力,能够控制关节刚性取任意的值,因此对摆动期降低关节刚性特别有用,可以收到高效摆动腿脚的效果。

除去 DD 电机驱动的场所,或者根本无电机驱动的被动步行机器人(passive walking robot)之外,要想达到关节转矩控制为零,在技术上是很难的。这主要是因为支撑期中,必须采用大减速比传动才能足以承受载荷。

因此,人们尝试通过机械的方法来实现相当于人类颌颞肌的机构^[7]。图 4.80 给出了这样的设计事例。机构让钢丝绳穿过关节的伸展侧和屈曲侧,利用图 4.80 所示的非线性弹簧机构,钢丝绳分别被电机牵引。由于非线性弹簧机构对钢丝绳的拉伸作用,理论上能在零到无穷大的范围内控制关节的刚性变化。既然能够从弹簧的位移计算出钢丝绳的张力,测量关节转矩,这样也就省去了应变片校正带来的许多麻烦。

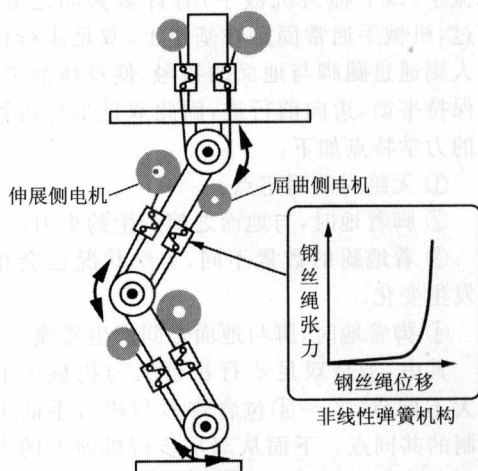


图 4.80 颌颞肌驱动式双足机器人^[7]

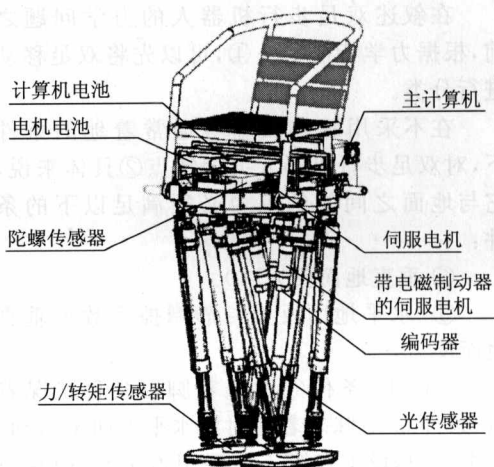


图 4.81 并联机构双足机器人

图 4.81 不属于拟人型的旋转关节型腿脚,而是一种机构独特的双足机器人。它利用所谓的斯图尔特平台的并联机构。由于在身体与脚掌之间配置了多个驱动器和杆件,因此它不仅能够分散载荷,而且其刚性很高,因为在理论上被动关节仅作用平移力,不作用弯矩。实验证明,与具有相同刚性的串联机构的腿脚机构相比,这样的结构能够减轻质量。

玄 相 昊

4.3.2 双足机器人的力学

双足拟人步行机器人一般是由头部、躯干、两手、双足等构成的多杆件机构,它的运动学和力学的数学处理方法,与工业机器人机械手(以下称为机械手)有许多共同之处。不过,机械手通常固定在基座上,双足步行机器人则通过腿脚与地面的接触,使身体前进,边保持平衡,边向前行进,因此双足步行机器人的力学特点如下:

- ① 无绝对的固定点。
- ② 脚着地时,与地面之间产生约束力。
- ③ 着地腿的数量不同,力学状况也会相应发生变化。
- ④ 脚着地时,脚与地面之间产生碰撞。

其中,①是双足步行机器人与机械手的最大不同点,②~④包含许多与机械手的力控制的共同点。下面从双足步行机器人的力学观点重新来审视一下②~④。

1. 双足移动的力学分类

在叙述双足步行机器人的力学问题之前,根据力学特征①~④,可以先将双足移动进行分类。

在不采用腿脚吸盘等通常着地的条件下,对双足步行机器人力学特点②具体来说,它与地面之间的约束力必须满足以下的条件:

- ⑤ 垂直地面反力 ≥ 0 。
- ⑤' 水平地面反力 \leq 静摩擦系数 \times 垂直地面反力。

实际上,条件⑤意味着脚以某种状况着地,条件⑤'意味着着地时沿水平方向不滑动。在本节中,设支撑脚不需要用力叉开,而且地面很不容易滑动,因此可以不考虑条件⑤'。

在双足步行时,将与地面接触,支撑重量的腿称为支撑腿,将不与地面接触的腿称为摆动腿。

关于地面反力的条件⑤是实现双足步行机器人运动的必要条件。按照保证该条件成立的步态,可以将腿脚移动分为静态步行、动态步行和跑步三类。

图 4.82 所示为人类的步行和跑步。若速度超过 $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$,则人类就从步行转换为跑步了。在图 4.82(a)中,可以认为步行是髋关节围绕支撑腿的踝关节描绘出一个半径为 l 的圆弧那样的运动。设髋关节的速度为 v ,则朝向髋关节支撑点的加速度是 v^2/l 。若该加速度大于重力加速度 g ,则来自地面的垂直反力为 0,这样的运动是不可能的。即步行的界限用 $v = \sqrt{gl}$ 表示^[8]。例如,设到髋关节的半径为 0.9 m , $\sqrt{gl} \approx 3 \text{ m/s}$,而实际上由于有能量消耗的缘故,在低于该速度下即可以从步行转换为跑步。

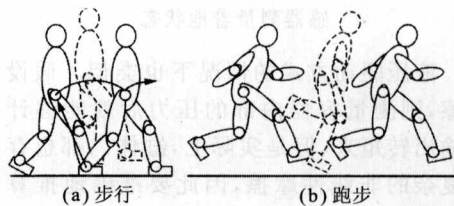


图 4.82 人类的步行和跑步

若从双足移动的形态来考虑,则步行可以视为两腿之一着地的形态,跑步为不存在两脚支撑相,而且移动的某些时段出现了两腿均离开地面的相的移动形态。表 4.6 所示为步行和跑步状态所对应的移动周期。

表 4.6 双足步行机器人的移动周期

(a) 步行周期						
	一个步行周期					
右腿	两脚 支撑相	摆动相	着地相	两腿 支撑相	单腿支撑相	
左腿	两腿 支撑相	单腿支撑相		两腿 支撑相	摆动相	着地相
(b) 跑步周期						
	一个步进周期					
右腿	跳跃相	摆动相	着地相	跳跃相	摆动相	
左腿	摆动相	着地相	跳跃相	摆动相	着地相	跳跃相

1) 静态步行

重心始终保持在由着地足所形成的凸多边形内的步行称为静态步行(图 4.83),它主要出现在多足机器人中。静态步行的优点是,只要系统的运动速度不太快,则不需要考虑条件(1),轨迹规划及控制也十分简单。实际上,迄今为止,在台阶或不平整地面的步行研究中,静态步行的特征发挥了重要的作用^[9]。

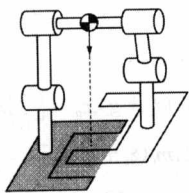


图 4.83 双足步行机器人的静态步行

2) 动态步行

重心不一定保持在由着地足所形成的凸多边形内的步行称为动态步行。如果双足步行机器人的脚底面积不大,或者踝关节驱动器的输出有限,那么就必须采用动态步行。动态步行系统的运动可以借助于倒立摆的模型来进行研究(参阅下一项)。在动态步行中,为了使条件(1)成立,必须根据倒立摆的自由运动,即支撑腿因重力而倒下的运动来规划系统的轨迹。由于动态步行系统处于静态表现出不稳定,因此它的控制比静态步行要复杂。它的优点是能够利用重力来加速,因此在最大移动速度和移动能量方面要优于静态步行。

3) 跑步

跑步中会出现全部腿离开地面的相,这时若是双足步行机器人可视同自由落体运动,而在着地时又将同时产生冲击力。当它与地面接触时,表现为与动态步行相同的倒立摆系统。跑步必须适应因着地而引起的巨大冲击力,又必须提供整个机器人离开地面

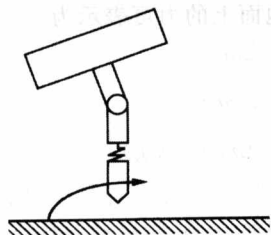


图 4.84 跳跃机器人的例子

所需要的足够功率,因此双足步行机器人要实现跑步,必须在技术上要进行创新。作为单腿跑步的例子,可以举出跳跃机器人,图 4.84所示为它的概念图^[10]。

2. 双足步行机器人的步行力学模型

为了研究双足仿人步行机器人的步行情况,首先说明一下它的力学模型。

1) 倒立摆模型

试用图 4.85 所示的简单倒立摆模型来研究双足步行机器人的动态步行^[11]。在该模型中,为了简单起见,忽略了腿的质量。图 4.85 中给出连续步行的状况,表示最终倒立摆向前方倒下,向前方跨出的摆动腿着地的瞬间。

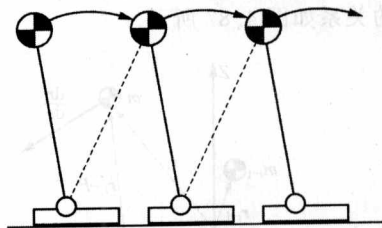


图 4.85 动态步行的倒立摆模型

为了实现稳态步行,支撑腿转换时的倒立摆高度必须一定。另外,由于支撑腿转换时伴有速度损失,因此与克服重力场提升的时间相比,必须将在重力场中加速的时间设定得较长。为了满足这些条件,倒立摆的长度不是固定不变的,而是慢慢将它的长度增加。具体到人类的动作,所对应的步行表现则是使膝关节弯曲着地,然后慢慢地将腿伸长,让上肢的重心提升到踝关节上。如上所述,倒立摆模型的结构虽然十分简单,但反映了步行的特性,它作为步行控制标准模型是很有用的。

2) 双足步行机器人的建模及力矩

双足步行机器人是具有多个驱动部分的多构件机构,在建模时,先预设以下假定条件:

- ① 步行系统由质点集合构成。
- ② 地面是水平的平面。
- ③ 地表面十分坚硬,无论受什么力或转矩作用都不动。

因此,如果设定垂直轴为 Z 轴,包含 X 轴、 Y 轴的平面与地面取得一致,则根据假定条件(1)~(3),可以将双足步行机器人的下肢质点模型简化为如图 4.86 所示。针对该模型计算双足步行机器人的步行角动量,得

到作用于脚底的转矩。

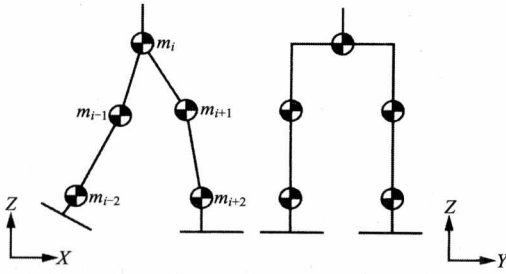


图 4.86 双足步行机器人的构成

在图 4.86 中, 设 m_i, r_i 分别为第 i 个质点的质量和在参考坐标系中的向量, 考虑空间上的某一点 P , 设该位置向量为 P 。各质量与向量的关系如图 4.87 所示。

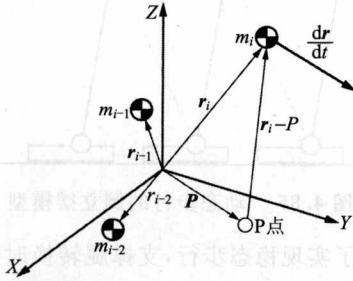


图 4.87 质点系模型

对于点 P 的全部角动量 L 用下式表示:

$$L = \sum_i (r_i - P) \times m_i (\dot{r}_i - \dot{P}) \quad (4.88)$$

设重力加速度为 G , 未知的外部转矩为 T , 根据达朗伯原理, 点 P 的质点系运动方程用下式表示:

$$\frac{dL}{dt} + \sum_i (r_i - P) \times m_i G + T = 0 \quad (4.89)$$

因此, 根据式(4.88)及式(4.89)可得

$$\sum_i m_i (r_i - P) \times \left[\left(\frac{d^2}{dt^2} r_i + G \right) - \frac{d^2}{dt^2} P \right] + T = 0 \quad (4.90)$$

然后, 利用式(4.90), 可以求出地面上的转矩。地面上的任意点可以描述为

$$P = [x_p, y_p, 0] \quad (4.91)$$

根据假定③, 由于地面不运动, 因此

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = 0 \quad (4.92)$$

即

$$T = \sum_i m_i (P - r_i) \times \left(\frac{d^2}{dt^2} r_i + G \right) \quad (4.93)$$

式中, 设向量 r_i, G 和 T 为

$$r_i = [x_i, y_i, z_i]$$

$$G = [0, 0, g]$$

$$T = [T_x, T_y, T_z]$$

假设上述地面的转矩不发生, 即 $T_x = T_y = 0$, 计算的结果就是轨迹规划上的 ZMP 轨迹, 它们可以用于机器人的动态步行^[12]。

若整理式(4.93), 可得地面上作用的转矩各分量为

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \sum_{i=0} m_i (z_i + g) y_p - \left[\sum_{i=0} m_i (z_i + g) y_i \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=0} m_i \dot{y}_i z_i \right] \\ T_y &= -\sum_{i=0} m_i (z_i + g) x_p - \left[\sum_{i=0} m_i \dot{x}_i z_i \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=0} m_i (z_i + g) x_i \right] \\ T_z &= \sum_{i=0} m_i \dot{y}_i x_p - \sum_{i=0} m_i \dot{x}_i y_p \\ &\quad - \left[\sum_{i=0} m_i \dot{y}_i x_i - \sum_{i=0} m_i \dot{x}_i y_i \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.94)$$

3. 步行中的地面反力

双足步行移动的特点是在步行中总有一条腿与地面接触, 利用它在着地点上获得的摩擦力前进。在本小节中, 我们针对脚底所受到的力、转矩进行运动分析。

1) 脚底所受的力和转矩

设关于地面上的点 P 的全部动量为 N , 它可以用下式表示:

$$N = \sum_i m_i \frac{d}{dt} (r_i - P) \quad (4.95)$$

设作用于双足步行机器人的未知外力为 E , 根据达朗伯原理, 点 P 的质点系的运动方程式为

$$\frac{dN}{dt} + \sum_i m_i G + E = 0 \quad (4.96)$$

根据式(4.92)、式(4.95)及式(4.96), 可以得到

$$\sum_i m_i \left(\frac{d^2}{dt^2} r_i + G \right) + E = 0 \quad (4.97)$$

若用各个向量的分量来表示式(4.97), 则作用于地面上的力可表示为

$$\left. \begin{aligned} E_x &= -\sum_i m_i \ddot{x}_i \\ E_y &= -\sum_i m_i \ddot{y}_i \\ E_z &= -\sum_i m_i (z_i + g) \end{aligned} \right\} \quad (4.98)$$

利用式(4.98)可以导出各种运动条件下的约束条件。例如, 在平移运动条件下, 由于步行系统必须与地面接触, 因此为

$$E_z = -\sum_i m_i(z_i + g) < 0 \quad (4.99)$$

若式(4.99)成立,在摩擦系数足够大的情况下,由于能够利用对地面平移的摩擦力,因此其他分量 E_x 及 E_y 可以取较大的值。

脚底发生的转矩表现为以下不同的情况,它取决于脚底与地面的着地状态,为了达到稳定步行,应该多点着地。

① 单点着地时,对地面造成旋转的摩擦力非常小,例如绕 z 轴的转矩 $T_z \approx 0$,即无法产生围绕 z 轴旋转的任何转矩。

② 两点着地时,不产生围绕两点连线轴的转矩,但能产生围绕它的垂直轴的转矩,不过其大小在维持两点着地的限度内。

③ 三点或三点以上着地时,只要相对于着地点形成的多边形的各条线段,有转矩将各着地点按压在地面上即可。

2) 脚底的零力矩点

图 4.88 为作用于脚底部的力的分布模型。若实际测量脚底部的分布反力,则可求出力 N 及力矩 M 。若考虑地面反力的合力作用点,则能够定义出一个围绕作用点的力矩为零的合力 R 。从对脚底所施加的力矩的实际意义来看,该点应该称为真零力矩点(以下称为真 ZMP)或地面反力中心点^[13]。

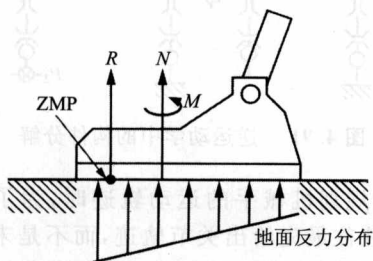


图 4.88 脚底的地面反力分布和 ZMP

用图 4.89 来说明真 ZMP 与脚底所施加的转矩向量的关系。设双足步行机器人步行时向左侧以任意加速度移动。为简单起见,图 4.89 中设质量 m 仅在腰部。

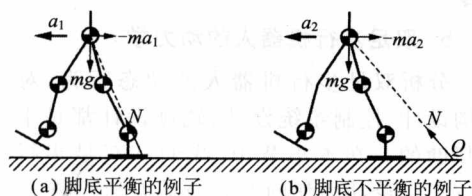


图 4.89 在 ZMP 处的力平衡

在图 4.89(a)中,加速度 a_1 产生的反作用力作用于腰部,它与由重力产生的向量产生合力。若该向量的延长线落入脚底中,在该点产生力 N 。

在图 4.89(b)中,实现加速度 a_2 的合力偏离于脚底之外。由于脚底内有真 ZMP,因此 Q 点处不存子 ZMP,结果双足步行机器人将摔倒。这意味着加速度 a_2 是不能实现的,必须重新提供适当的加速度,使 Q 点落入脚底之内。这里的 Q 点与前述的真 ZMP 不同,称为轨迹规划上的 ZMP。

为了实现能够保持动态平衡的步行,重要的是如何设计轨迹规划上的 ZMP。采用式(4.94),可求出多质点系统的轨迹规划上的 ZMP。

3) 着地模型

可以将脚底着地视为一种碰撞现象。通过解拉格朗日碰撞方程式,可以求出着地前后的广义速度向量 $\dot{\xi}^-$ 和 $\dot{\xi}^+$ 的关系。

设机器人的运动方程式为

$$A(\xi)\ddot{\xi} + B(\xi, \dot{\xi}) = D\ddot{T} + E\mathbf{A} \quad (4.100)$$

其中, $\xi = [x_B^T, \theta_B^T, \phi^T]^T$,

式中, x_B 、 θ_B 、 ϕ 分别为躯体部分的重心位置、姿态、关节角度; \mathbf{A} 为地面反力向量; \mathbf{T} 为关节转矩向量。

如果将着地时产生的对地面的约束表示为 $d(\xi) = 0$, 该约束在着地后也能被满足时,则下式成立:

$$\mathbf{F}^T \dot{\xi}^+ = 0 \quad (4.101)$$

式中, $\mathbf{F} = \left(\frac{\partial d}{\partial \xi} \right)^T$ 。

若设脚底与地面之间产生的冲击力向量为 ρ , 根据拉格朗日碰撞方程式, 求出下式:

$$A\dot{\xi}^+ - A\dot{\xi}^- = \mathbf{F}\rho \quad (4.102)$$

根据式(4.101)及式(4.102), 在 $\mathbf{F}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F}$ 为正则时, 根据下式:

$$\begin{aligned} \rho &= (\mathbf{F}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T (\dot{\xi}^+ - \dot{\xi}^-) \\ &= -(\mathbf{F}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \dot{\xi}^- \end{aligned} \quad (4.103)$$

可以求出着地前后广义速度向量的关系如下:

$$\dot{\xi}^+ = [\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F} (\mathbf{F}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T] \dot{\xi}^- \quad (4.104)$$

缓和碰撞冲击力的措施有多种, 例如在脚底安装黏弹性材料, 但此时的运动方程式

应改写为

$$A(\xi)\ddot{\xi} + B(\xi, \dot{\xi}) = DT + E_R(\xi, \dot{\xi}) + E_L(\xi, \dot{\xi}) \quad (4.105)$$

式中, E_R 及 E_L 为地面反力, 它们随脚底刚体部分与地面之间的相对位置和时间而变化而变^[14]。

4. 双足步行机器人的运动学

下面我们以图 4.90 所示的双足步行机器人为对象讨论它的运动学。为了简便起见, 设所有的关节均由驱动器驱动。

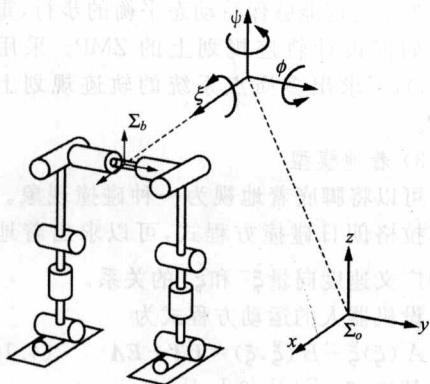


图 4.90 双足步行机器人的构成

将躯体的重心作为机器人上固定的坐标系的原点 Σ_0 。这样, 固定在机器人上的坐标系的原点就不是固定在绝对坐标系中的点(如地面接触点), 一旦被取成与机器人一起运动的点后, 在这种场合下:

- ① 状态变量的数量增加。
- ② 必须根据达朗贝尔原理施加惯性力(相当于坐标系的加速度)。

这样处理可能导致问题的复杂化, 但是它有以下优点:

- ① 能够求出所有着地脚的所有地面反力。
- ② 由于两条腿的处理是对称的, 因此易于用公式表示, 也容易编程。
- ③ 可适用于双足从地面离开的相。

一般来说, 若系统状态变量的维数为 n , 控制输入的维数为 k , 腿数为 l , 则对于各条腿有 6 个自由度的双足机器人, 得到 $n=18, k=12$ 。

选择下式作为状态变量 q 和控制输入 τ :

$$q = [q_b, q_1, q_2]^T \in R^n$$

$$: q_b = [x, y, z, \xi, \phi, \psi],$$

$$q_i = [\theta_{i1}, \dots, \theta_{i6}]^T \quad (i=1 \sim 2)$$

$$\tau = [\tau_1, \dots, \tau_l]^T \in R^k$$

$$: \tau_i = [\tau_{i1}, \dots, \tau_{i6}]^T \quad (i=1 \sim 2)$$

式中, q_b 及 q_i 为配置在腰部的坐标系和第 i 腿的关节向量; τ 为对电机施加的转矩向量。

设支撑腿为 i , 在状态变量之间存在着表示脚与地面接触的如下 6 个约束条件:

$$p(q_b, q_i) = c_i \quad (p \in R^6) \quad (4.106)$$

另外, 若给出摆动腿的脚部轨迹为 s_j , 则有

$$p(q_b, q_j) = s_j(t) \quad (4.107)$$

由上述可知, 给出躯体的位置、姿态, 根据式(4.106)或式(4.107)求出各个关节的角度、角速度、角加速度的问题属于逆运动学问题, 其计算方法与机械手相同。

如果是机械手, 逆运动学问题是给出末端执行器的位置、姿态来求解各个关节, 与此不同的是, 对于双足步行机器人来说, 实际上在多数情况下是将腰部和摆动腿末端部的的位置作为目标值来解逆运动学。图 4.91 的例子要求将双足步行机械的腿分解为支撑腿和摆动腿两个部分, 给出部分躯体的轨迹 P_1 和末端脚部的轨迹向量 P_2 。

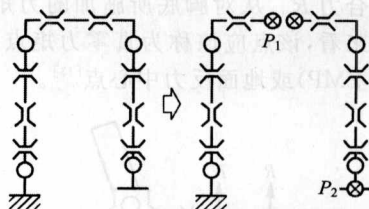


图 4.91 逆运动学中的构件分解

在规划机械手的运动轨迹时, 为了简单起见, 往往最先给出关节轨迹, 而不是末端轨迹。在有足机器人的场合, 则应该在尽可能满足以下条件的前提下给出关节轨迹:

- ① 让脚尖沿地面的法线方向上下运动, 不受地面的羁绊。
- ② 为了尽可能地减小与地面碰撞时的冲击, 腿部着地时的地面法线方向速度分量应为零。

5. 双足步行机器人的动力学

分析双足步行机器人的动态行为, 对于结构设计、控制系统设计、轨迹设计都是十分有帮助的。在本小节中, 我们从双足步行的观点来讨论动力学问题和逆动力学问题。

1) 运动分解

一般有足机器人的自由度与驱动器的数量及腿的数量成正比。在双足步行机器人中,虽然腿的数量顶多就是两条,但是由于配置的自由度较多,运动方程式比较复杂,很难在三维空间中进行处理。另外,在有足机器人中,各个关节的动作范围不像机械手那样大,因此可以考虑如图 4.92 所示,将其分解为 3 个平面,即横摇轴、纵摇轴、偏转轴的各平面运动来处理。横摇平面也称为横侧面(frontal plane),纵摇平面也称为纵向面(sagittal plane)。在以下关于动力学的讨论中,除了来自地面的约束力以外,我们假定各个面的运动不耦合。这样,若将如图 4.90 所示的双足步行机器人在纵向面内建模,就有如图 4.93 所示的 8 杆模型。

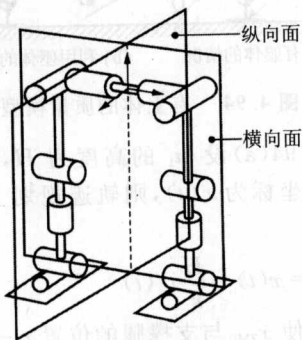


图 4.92 运动分解

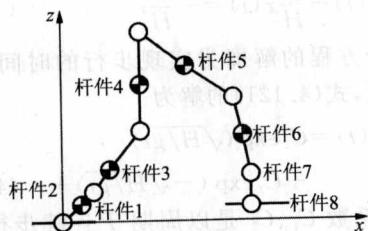


图 4.93 纵向面中的建模

2) 双足步行机器人的运动方程式

运动方程式是描述动态双足步行机器人的行为的微分方程式。假设机器人与地面之间没有约束,那么自由空间中的双足步行机器人的运动方程式应该与机械手相同,用下式表示:

$$M\ddot{q} = C\tau + g + h + d \quad (4.108)$$

式中, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $\tau \in R^k$ 为关节转矩; $C \in R^{n \times n}$ 为驱动矩阵; $g(q) \in R^n$ 为重力项; $h(q, \dot{q}) \in R^n$ 为离心力; $d(\dot{q}) \in R^n$ 为摩擦

阻力。

双足步行的特征在于支撑腿的约束。若设有 h 条腿着地,则全部有 $m=6h$ 个约束条件存在。

$$e(q) = 0 \quad (4.109)$$

式中,有

$$e = [\dots, p(q_b, q_i) - c_i, \dots] \in R^m \quad (4.110)$$

这时,式(4.108)的系统在式(4.109)的约束条件下的运动方程式可用下式表示:

$$M\ddot{q} = C\tau + g + h + d + E^T f \quad (4.111)$$

式中, $E = \partial e / \partial q$, $f \in R^m$ 为地面压力。这时式(4.111)的次数虽然为 n ,但系统的自由度因约束而减少为 $n-m$ 。

3) 双足步行机器人的正运动学

正动力学方程是在给出系统的状态 q 及 \dot{q} , 控制转矩 τ 时描述系统行为的方程。具体来说,是要求出系统的加速度 \ddot{q} 和地面反力 f 。首先对式(4.109)进行时间微分,再对 $E\dot{q} = 0$ 进行时间微分,得到

$$\dot{E}q + E\ddot{q} = 0 \quad (4.112)$$

根据式(4.111),有

$$\ddot{q} = M^{-1}(C\tau + g + h + d) + M^{-1}E^T f \quad (4.113)$$

因此,代入式(4.112)中,可得

$$\begin{aligned} \dot{E}q + EM^{-1}(C\tau + g + h + d) \\ + EM^{-1}E^T f = 0 \end{aligned} \quad (4.114)$$

由式(4.114)可得

$$\begin{aligned} f = -(EM^{-1}E^T)^{-1} [EM^{-1} \\ (C\tau + g + h + d) + \dot{E}q] \end{aligned} \quad (4.115)$$

在给出转矩 τ 后,可计算地面反力 f 。

再将式(4.115)代入式(4.113)中,可得到

$$\begin{aligned} \ddot{q} = [M^{-1} - M^{-1}E^T(EM^{-1}E^T)^{-1}EM^{-1}] \\ \times (C\tau + g + h + d) \\ - M^{-1}E^T(EM^{-1}E^T)^{-1}\dot{E}q \end{aligned} \quad (4.116)$$

根据式(4.116),在给出转矩 τ 后,可以求出系统的加速度 \ddot{q} 。

4) 双足步行机器人的逆动力学

逆动力学是反过来,为了得到某状态 q 的转矩的方程式,在双足步行机器人的控制中,它被用来计算前馈转矩。

为了使双足步行机器人沿某轨迹运动,所需要的前馈转矩可以通过对 τ 求解式(4.114)得到。但是,这时存在下述的困难。

① 不仅需要给出系统轨迹 $q(t)$,而且还

必须给出地面反力 $f(t)$, 但如何决定地面反力 f 为好, 还不清楚。

② 在式(4.105)的约束条件下, 由于双足步行机器人一般有 $n > k$, 因此无法对(4.114)求解任意轨迹 $q(t)$ 和地面反力 $f(t)$ 的控制输入 τ 。

双足步行机器人的运动在很大程度上取决于约束条件式(4.109), 因此为了实现某种规划轨迹, 必须保证规定的约束条件成立。但是由于地面是不动的, 因此它的力控制方法与机械手是不同的。只要能够实现满足式(4.109)的规划轨迹, 则对约束力的值不一定非要严格控制。因此, 这里假设实施的控制能够保证约束条件式(4.109)成立, 但是不对约束力 f 的值作严格的控制。即问题①中的地面反力 f 不被直接作为控制对象, 而是由系统状态 q 及 \dot{q} , 以及控制输入 τ , 从式(4.114)中来决定。

从 n 次方程式(4.114)中消去 $E^T f$ 项, 于是可以得到与式(4.111)描述的系统的自由度相等的 $n-m$ 次方程式。

$$QC\tau = Q[M\ddot{q} - (g+h+d)] \quad (4.117)$$

其中,

$$P = M^{-1} - M^{-1}E^T(EM^{-1}E^T)^{-1}EM^{-1}$$

$$Q = E_p P \in R^{(n-m) \times n}$$

这里, 应选择 E_p 使得 $E^* = [E_p, E]$ 为正则矩阵。

根据式(4.117), 可以得到满足约束条件式(4.109)的 τ [15]。在单腿着地时, $n-m \leq k$, 因此②中所述问题也能得到解决。在两条腿或两条腿以上着地时, $n-m < k$, 由式(4.117)无法唯一决定 τ , 还需要其他附加条件。作为例子, 这里引入“使转矩的平方和为最小的条件”[16]。这样, 在式(4.117)的条件下, 控制输入 τ 的求解问题变成

$$\sum_{i=1}^k \tau_i^2 \rightarrow \min \quad (4.118)$$

利用拉格朗日的待定乘数法, 通过下式的求解, 可得到式(4.118)的解:

$$\begin{bmatrix} QC & 0 \\ 2I & -(QC)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q[M\ddot{q} - (g+h+d)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.119)$$

6. 高级步行力学

为了实现平稳的步行, 双足步行机器人

的运动有各种运动补偿的措施。在本小节中将简要说明专门为双足步行机器人制定的运动补偿方法。

1) 利用躯体实现运动补偿

在不少场合, 实际的双足步行机器人都借助于躯体的力矩主动实现运动补偿。本小节将介绍关于力矩的向量运算。以图 4.94 所示的由两条腿和一个躯体构成的双足步行机器人为例来进行说明。为了使讨论简单起见, 假设它的质量仅位于躯体和腰部。

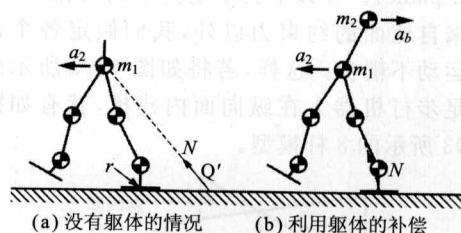


图 4.94 有上体的质量模型

图 4.94(a) 设 m_1 的高度为 H , 重心的 x 轴方向的坐标为 $x(t)$, 则轨迹规划上的 ZMP 的轨迹为

$$x_{ZMP} = x(t) - \frac{H}{g} \ddot{x}(t) \quad (4.120)$$

为了使 x_{ZMP} 与支撑腿的位置 r 一致, 必须满足关于 x 的二阶微分方程

$$\ddot{x}(t) - \frac{g}{H} x(t) = -\frac{g}{H} r \quad (4.121)$$

该微分方程的解即为实现步行的时间轨迹。实际上, 式(4.121)的解为

$$x(t) = C_1 \exp(\sqrt{H/g}t) + C_2 \exp(-\sqrt{H/g}t) + r \quad (4.122)$$

式中, 系数 C_1, C_2 是以周期 T 连续步行中的连续函数 [17], 可以由给定的边界条件得到。

按照上文所述, 虽然能够求解出理想化的步行轨迹规划的 ZMP, 但是一旦加入外力或地面状态等不确定要素的干扰, 就会发生步行无法满足 ZMP 标准的情况。在这种情况下, 如附加图 4.94(b) 所示的上体动作, 轨迹规划上的 ZMP 离开脚底的趋势就将得到补偿, 从而实现稳定步行。例如, 用多质点模型腰部的相对坐标描述力矩, 表达躯体的相对运动。不过随着质点数的增加, 通过解析求解的难度也在加大, 此时可以改用数值计算。下面给出一个计算的例子:

步骤 1 生成多质点模型的 ZMP 轨迹。

步骤 2 根据 ZMP 和脚底位置偏移的推算, 计算修正用的躯体加速度向量 a_b 。

步骤 3 由加速度数值积分计算补偿运动。

需要注意的是, 躯体补偿运动的解必须在任意步行条件下均收敛。高西等采取改变脚底着地点等措施, 解决了利用躯体的运动补偿动作的收敛性问题^[18]。详细内容可阅读本书中的控制部分的说明。

2) 利用踢腿动作实现运动补偿

踢腿动作是指在支撑腿转换为摆动腿的时候, 脚底向地面下压的动作。关于利用踢腿的补偿方法, 人们按照控制目的不同而提出了各种方案。例如, 想以大步幅行走, 就可以利用踢腿的方法来实现。

图 4.95(a) 中给出了踝关节自由旋转的倒立摆型步行方式。图 4.95 中, ZMP 位于脚底的某个范围内, 仅处于支撑腿的转换期时以一定大小的步幅前行。图 4.95(b) 为脚尖具有自由度的结构, 步行的前半周期是以踝关节的倒立摆模式动作, 后半周期则是踝关节被锁住, ZMP 被移动至脚尖之下。利用该踢腿动作, 能够实现更大步幅的行走。

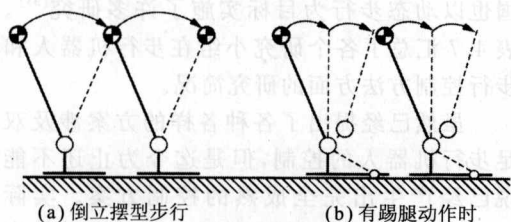


图 4.95 踢腿动作的效果

踢腿动作在双足步行机器人平移中起到支撑腿辅助转矩的作用。例如, 与利用支撑腿转矩获得双足步行机器人的平移力相比, 实际上让支撑腿自由, 让摆动腿一侧踢腿平移, 更容易产生平移力。基于主动、节奏性踢腿实现稳定步行的研究成果已经有报道^[19,20]。

【附录】建模的具体例子

下面以图 4.96 所示的平面两杆件系统为例, 具体叙述建模的步骤。首先按照下述设置状态变量 q :

$$q = [x, z, \phi, \theta] \quad (4.123)$$

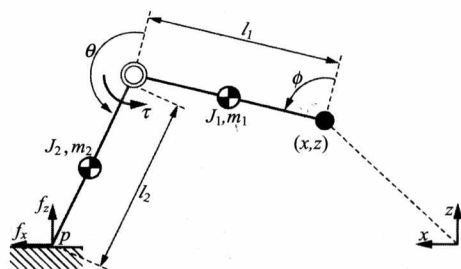


图 4.96 两杆件的双足步行模型

(1) 运动学 支撑腿的末端位置 p 用下式表示:

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin \phi + l_2 \sin \theta + x \\ l_1 \cos \phi + l_2 \cos \theta + z \end{bmatrix} \quad (4.124)$$

(2) 逆运动学 在指定摆动腿的末端位置 (x, z) 和支撑腿的末端位置 p_1, p_2 的情况下, 其角度 ϕ 和 θ 用下式求出:

$$\phi = \text{atan}(p_2 - z, p_1 - x) \pm \text{atan}(k_1, k_2) \quad (4.125)$$

$$k_2 = \cos \lambda$$

$$k_1 = \sqrt{(p_1 - x)^2 + (p_2 - z)^2 - k_2^2}$$

$$\lambda = \theta + \phi = \text{atan2}(k_{1a}, k_{2a})$$

$$k_{1a} = (p_1 - x)^2 + (p_2 - z)^2 - l_1^2 - l_2^2$$

$$k_{2a} = \sqrt{4l_1^2 l_2^2 + l_1^2 + l_2^2 - (p_1 - x)^2 - (p_2 - z)^2}$$

(3) 运动方程式 首先求解无约束系统的运动方程式。若忽略黏性阻力, 则有

$$M \ddot{q} = C\tau + g + h \quad (4.126)$$

其中,

$$M =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 + m_2 & 0 & (m_1 p_1 + m_2 l_1) \cos \phi \\ \vdots & m_1 + m_2 & -(m_1 p_1 + m_2 l_1) \sin \phi \\ \vdots & \vdots & J_1 + m_1 p_1^2 + m_2 l_1^2 \\ \text{(Symmetric Matrix)} & & \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} 0 \\ -(m_1 + m_2)g \\ (m_1 p_1 + m_2 l_1)g \sin \phi \\ m_2 p_2 g \sin \theta \end{bmatrix}$$

$h=$

$$\begin{bmatrix} (m_1 p_1 + m_2 l_1) \sin \phi & m_2 p_2 \sin \theta \\ (m_1 p_1 + m_2 l_1) \cos \phi & m_2 p_2 \cos \theta \\ 0 & -m_2 l_1 p_2 \cos (\phi - \theta) \\ -m_2 l_1 p_2 \sin (\theta - \phi) & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \phi^2 \\ \dot{\theta}^2 \end{bmatrix}$$

将杆件末端着地设定为约束条件,则下式成立:

$$e = [p_1 - x_c, p_2 - z_c]^T = 0 \quad (4.127)$$

根据式(4.123)及式(4.124),有约束作用的系统运动方程式为

$$M \ddot{q} = C\tau + g + h + E^T f \quad (4.128)$$

其中,

$$E = \frac{\partial e}{\partial q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l_1 \cos \phi & l_2 \cos \theta \\ 0 & 1 & -l_1 \sin \phi & -l_2 \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$f = [f_x, f_z]^T \quad (4.129)$$

(4) 动力学 根据以上结果,由式(4.115)可得到地面反力 f ,由式(4.116)可得到最大加速度。于是式(4.115)的矩阵 \dot{E} 为:

$$\dot{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_1 \sin \phi \dot{\phi} & -l_2 \sin \theta \dot{\theta} \\ 0 & 0 & -l_1 \cos \phi \dot{\phi} & -l_2 \cos \theta \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4.130)$$

(5) 逆动力学 从式(4.125)中求解 τ ,对任意的 f_x, f_z ,求出驱动转矩如下:

$$C\tau = M\ddot{q} - g - h - E^T f \quad (4.131)$$

川路茂保 松永信智

4.3.3 双足机器人的控制

双足拟人型步行机器人在机器人的移动方式中是非常有魅力的一种方式。应该说,特别是在与人类共存的活动空间中移动时,它是最合适的方式。不过,双足拟人型步行系统本质上属于不稳定系统,因此对它们的控制非常困难。为了双足拟人型步行机器人的实用化,还存在许多尚未解决而又必须解决的问题。

现在人们正在从生理学和运动学的观点^[21~23],以及控制工程学和机器人工程学的观点对双足步行展开研究。

从生理学、运动学的观点进行研究时,有人通过电视摄像机、肌电图、脚底压力传感器等手段对人类步行进行测量,试图推算出关

节力转矩,或者阐明以脑为中心的生物体内的控制机理,有些研究人员的研究目的在于探索假肢的应用。

从控制工程学和机器人工程学的观点研究双足步行,其实也有助于补充上述生理学、运动学方面的研究。

关于双足步行控制的理论研究,是20世纪60年代后半期由塞尔维亚的学者 Vukobratovic 等率先开展和积极推进的^[24,25]。Vukobratovic^[26]在1973年将有关方面的研究成果加以汇总归纳,写成了专著《步行机器人与人工足》一书。在这些研究中,采用了多自由度分析模型,提出了零力矩点(ZMP)的概念和程序协调控制等方案。此后,美国的 Hemami^[27,28]、日本的伊藤^[29]、山下^[30]等用少自由度模型进行了理论分析。这些研究主要将现代控制理论引入步行控制,俄罗斯的 Beltskii 和 Larin 继续了 Vukobratovic 等的研究,直至最近,发表有关步行控制理论分析的论文仍然十分丰富^[31,32]。

实际制作双足步行机器人并着手步行控制研究,是从1970年左右起由日本的加藤等及英国的 Witt 等开始的。在日本,特别是高西等、井上等、平井等开展了多项研究。在美国也以动态步行为目标实施了许多研究^[33]。表4.7汇总了各个研究小组在步行机器人和步行控制方法方面的研究简况。

虽然已经提出了各种各样的方案涉及双足步行机器人的控制,但是迄今为止还不能说已经产生出完全成熟的控制方案。实际上,人类对步行控制的机理也还不能说是完全明了。所以,本书打算以适合步行机器人的实际控制方法为主对其加以介绍。

1. 零力矩点及步行稳定性

若双足步行机器人的脚底抬起,形成一点支撑的状态,会进入一个很难驾驭的旋转运动,这有可能会产生导致跌倒。如果围绕支撑多边形(路面与脚底着地点形成的面积最大的凸多边形)所有的边和点不产生向外的力矩,而仅仅产生向内的力矩,那么双足拟人型步行机器人就能够维持稳定的支撑状态(图4.97)。如果步行是属于静态的,而且速度非常慢,从中心向下的垂线与路面的交点落入脚

表 4.7 双足步行机器人的步行控制方式

研究小组	双足步行机器人 (自由度 P:纵摇 R:横摇 Y:偏转)	步行控制方式、驱动器、其他
加藤、高西(早稻田大学)	1972 WL-5 (P:6,R:2,Y:2,躯体:1) 1984 WL-10RD(P:6,R:4,Y:2)	支撑腿交换相的机械阻抗控制, 电液伺服
三浦、下山(东京大学)	1987 WL-12(P:6,躯体:3) 1980 Biper-3(P:1,R:2) 1981 Biper-4 (P:5,R:2)	躯体上身补偿型动态步,三维高 跳型步行
伊藤、成清、武市(名古屋大学)	1984 步(P:6)	两腿支撑相控制的理论分析及实 验,高增益反馈的动态步行实验
舟桥(东京工业大学)	1982 MEG-2(腿:1,躯体:1)	复杂连杆机构和1台电动机生成 脚部轨迹
美多(千叶大学)	1980 CW-1(P:6) 1983 CW-2 (P:6) 1984 CW-3D (P:6,R:4,躯体:1)	最佳调节器步行控制 有踢腿动作的步行
加藤(九州工业大学)、森(东京工 业大学)	1979 BIPMAN(P:2,腿长可变)	由 Van der Pol 方程式生成步行模式
佐藤(芝浦工业大学)	1985 ASSHY-15(臂:10,躯体:2,腿:12)	液压驱动器、多自由度机器人
有本、宫崎、川村(大阪大学)	1982 Idaten-2 号(P:6,躯体:1)	低阶模型、分层控制、学习控制、 两腿支撑相理论分析
增渊、古庄(大阪大学)	1981 健脚 1 型(P:4)	局部高增益反馈低阶模型
古庄、佐野(岐阜大学)	1984 健脚 2 型(P:6) 1987 BLR-G1 (P:6,R:2,躯体:1) 1988 BLR-G2 (P:6,R:2)	有踢腿动作的步行 利用脚底压力、速度、踝关节转 矩、倾斜角等传感器信息的动态步 行,步行系统的角动量控制
桥本(电气通信大学)	1983 SMA-LEGS(P:6)	形状记忆合金驱动器
北村、吴松(神户大学)	1984 9 连杆双足步行(P:6,R:2)	神经计算应用于轨迹规划
川路(熊本大学)	1983 Stirder-2(P:6)	逆运动学目标轨迹生成
梶田·谷(机械技术研究所)	1987 5 连杆双足步行机器人(P:4)	保持位能轨迹为基准的控制
M. H. Raibert (MIT)	1985 5 连杆双足步行(P:2,腿长可变)	跳跃型步行,液压驱动器
高西、山口(早稻田大学)	1996 WABLAN(下肢:6,上肢:14, 手:6,躯体:3,颈:2,眼:4)	躯体上身补偿型动态步行,跟踪步 行,AC·DC 电机
高西(早稻田大学)·林(神户大 学)	2001 WABLAN-RIV(下肢:12,上肢: 14,手:6,躯体:3,颈:4,眼:4)	躯体上身补偿型动态步行,跟踪 步行,柔顺控制,AC·DC 电机
吉田、北野(ERATO)	2000 morph1 (下肢:12,上肢:10,躯 体:2,头:2)	DC 电机
吉田、北野(ERATO)	2001 morph 3 (下肢:12,上肢:12,躯 体:2,头:4)	动态步行,DC 电机

底的范围内,脚底就不会抬起。将这一概念扩展到动态步行,就是零力矩点(ZMP)。ZMP是考虑到作用于双足拟人型步行机器人的惯性力、重力的合力、合力矩来定义的^[25]。

利用计算机仿真进行各个关节轨迹规划时,如果ZMP沿箭头所示方向向图4.98斜

线包围的区域移动,那么遵循这样的轨迹行进就不会发生脚底抬起的现象。根据步行实验发现,ZMP一定是处于斜线所示的范围内。当形成一点支撑的局面、脚底抬起的场合,ZMP即为该支撑点本身。

双足步行系统在一步区间内形成倒立

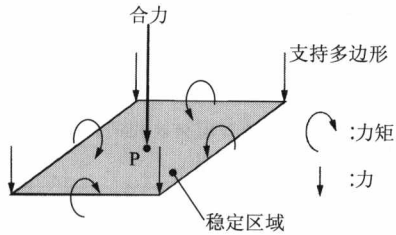


图 4.97 稳定区域内的 ZMP

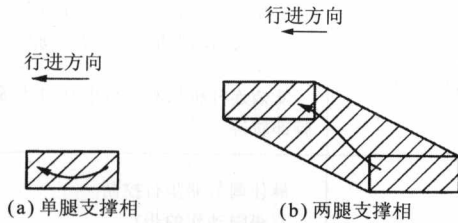


图 4.98 ZMP 的可能范围

摆, 其在本质上属于不稳定系统。所以, 设计双足步行控制时, 步态的动态稳定性是十分重要的。这里我们以 Gubina 和 Hemami^[34]等的研究为例来解释步态动态稳定性问题。分析的对象如图 4.99(a) 所示, 抽象成为一个由躯体、无质量腿部构成的模型, 在纵向面(sagittal plane, 沿前进方向且垂直于地面的平面)内对步行过程建模。该模型的腿部长度可变, 因此它具有 ϕ_1 、 ϕ_2 、 r 3 个自由度, 该系统的运动方程式为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + g(\theta, \dot{\theta}) = Du$$

式中, θ 为广义坐标向量, 这里

$$\theta = [r, \phi_1, \phi_2]^T$$

这时 M 、 g 、 D 由下式给出:

$$M(\theta) =$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & mr^2 \\ mlsin(\phi_1 - \phi_2) & mrlcos(\phi_1 - \phi_2) \\ mlsin(\phi_1 - \phi_2) & mrlcos(\phi_1 - \phi_2) \\ J + ml^2 \end{bmatrix}$$

$$g(\theta, \dot{\theta}) =$$

$$\begin{bmatrix} -mr\dot{\phi}_1^2 - ml\dot{\phi}_2^2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + mg\cos\phi_1 \\ 2mr\dot{r}\dot{\phi}_1 + mrl\dot{\phi}_2^2 \sin(\phi_1 - \phi_2) - mgr\sin\phi_1 \\ 2ml\dot{r}\dot{\phi}_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) - mlr\dot{\phi}_1^2 \sin(\phi_1 - \phi_2) \\ -mlg\sin\phi_2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

上式中的 $M(\theta)$ 一般叫做惯性矩阵, 是正的对称矩阵, $g(\theta, \dot{\theta})$ 是包括离心力、哥氏力和重力等项在内的向量, 输入 u 是由控制腿长的力 u_1 和支撑腿的髋关节转矩 u_2 两个元素构成的二维向量。

控制方式采用如下式所示的线性反馈的控制:

$$u_1 = -h_{p1}\Delta r - h_{d1}\Delta \dot{r} + \bar{u}_1$$

$$u_2 = h_{p2}(\phi_{2r} - \phi_2) - h_{d2}\dot{\phi}_2$$

然后再进行步长控制。图 4.99(b) 给出从大的初始外部干扰到复原的过程的第 3 步、4 步、5 步在 $(\phi_1, \dot{\phi}_1)$ 平面中的轨迹。实线表示轨迹, 支撑腿交换前、后的状态用虚线相连。由于设躯体的目标角度 ϕ_{2r} 为零, 故躯体姿态几

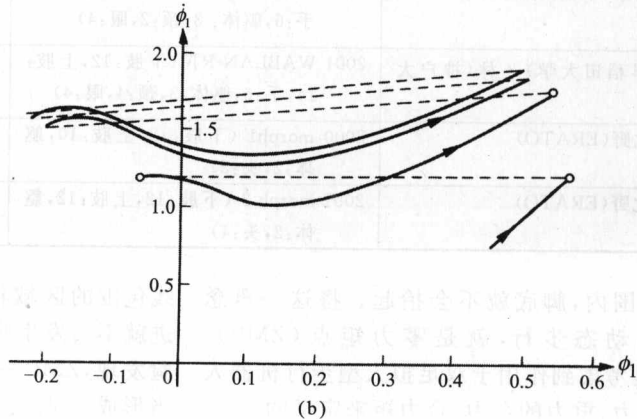
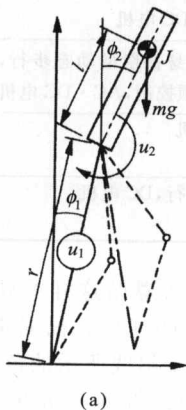


图 4.99 理想模型的稳定性分析

乎保持垂直(图 4.99 中没有画出),即躯体姿态的稳定性将得到保证。从图 4.99 中可知, (ϕ_1, ϕ_1) 平面的轨迹基本上沿一定的轨迹重复,这时的步态称为是动态稳定的。

古庄纯次 佐野明人 林宪玉

2. 单腿支撑相和两腿支撑相的统一模型

在图 4.100 所示的步行中,脚底呈现出各种各样的着地状态。在图 4.100(d)的状态中,步行系统的运动方程式和机械手末端执行器未与外界接触的状态下的方程式相同,它的推导过程比较简单。在图 4.100(b)、(c)和(e)中,前后腿的脚底有一部分或全部着地,在这种状态下的系统受到完全的约束,所以自由度和杆件数不会一致,运动方程式的推导会比较困难。在这些情况下,最有效的解决办法是根据未受约束状态的运动方程式,用拉格朗日乘数推导受到约束的状态运动方程式,具体方法如下所述^[35,36]。预先将 r 个约束条件集中表示为

$$\phi(\theta) = 0 \quad (4.132)$$

式中,设 θ 为各个关节弯曲角度所构成的 n 维关节角度向量。这时的运动方程式可以表示如下:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + g(\theta, \dot{\theta}) = Du + S^T \lambda \quad (4.133)$$

其中,

$$\begin{aligned} S &= \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \\ \lambda &= [SM^{-1}S^T]^{-1} \\ &\times \left[SM^{-1}g - SM^{-1}Du - \frac{dS}{dt}\dot{\theta} \right] \quad (4.134) \end{aligned}$$

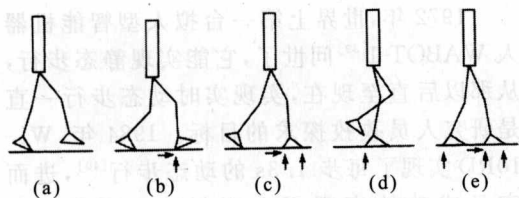


图 4.100 纵向面内脚底的着地状态

若式(4.133)中的 $\lambda = 0$,即可求出未受约束状态下的运动方程式。拉格朗日乘数 λ 相当于为维持该约束而在约束点作用的力(步行情况下为地面反作用力)^[37]。如果采用这个方法,图 4.100(b)~(e)所示的步行就可以用图 4.100(a)所示的步行运动方程式加上约束力项 $S^T \lambda$ (图 4.100 中用箭头表示约束力)来表示。为了使方法更加简单化,还可以采

用所谓补偿函数的虚位能方法^[38]。这些方法的优点是只要预先有一个运动方程式即可。

在有关步行机器人的许多研究中,都将图 4.100(d)的单腿支撑相(single support phase)作为基本状态。在这些研究中,假设支撑腿的脚底在地面上是固定不动的,然后对支撑腿踝关节以上的部分建模,至于支撑腿的转换动作,一般用拉格朗日碰撞方程式来建模^[27]。

3. 单腿支撑相的控制

在步行控制中分为单腿支撑相、两腿支撑相的不同模型,下面我们来讨论有关它们的基本问题。对于单腿支撑相,重要的内容是摆动腿向前方摆动时的轨迹控制问题和支撑腿踝关节转矩的控制问题。支撑腿踝关节转矩控制的重要意义体现在以下两个方面。不过,本节仅以图 4.100(d)所示的步行状态为例,对纵向面的运动控制进行讨论。

(1) 步行停止是通过让围绕支撑腿踝关节的角动量为零来实现的。根据围绕支撑腿踝关节的步行系统的角动量守恒定律可知,步行系统围绕支撑腿踝关节的角动量仅随外部力矩,即支撑腿踝关节转矩和重力矩的变化而变化。由于重力矩取决于步行系统的重心位置,因此一般无法将其选作控制输入。这样就只剩下踝关节转矩来充当角动量控制的主要控制输入。但是,假如是人的脚底,由于踝关节已经位于脚底的最后部,因此几乎无法用踝关节转矩来增加角动量。

(2) 支撑腿踝关节转矩可被用来控制 ZMP。例如,若沿着减少角动量的方向加强踝关节转矩,则 ZMP 移向脚尖,而脚底如图 4.100(a)所示那样抬起。若让踝关节处于自由旋转状态,则 ZMP 位于踝关节的近似正下方,此时脚底无法抬起。

可见,单腿支撑相的支撑腿踝关节转矩的控制起到非常重要的作用。但是关于它的控制方法至今还没有进行深入的研究。不管在什么样的步行控制方式中,在控制踝关节转矩方面,步行系统的角动量和 ZMP 的位置都是重要的指标。

4. 两腿支撑相的控制

我们以图 4.100(c)所示的踢腿状态为例,来介绍两腿支撑相(double support phase)的步行控制。首先对前腿踝关节以上的部分

建模。设杆件数为 $n=6$ 。在这期间,由于步行系统绕前腿踝关节受到负的重力矩作用,该期间前进速度在下降,因此利用地面反力的踢腿对于控制就具有很大的意义。与杆件系统仅剩下 $n-r$ 个自由度(该值在图 4.100(c)中为 4 个)相比,两腿支撑相的驱动关节的驱动器数(在图 4.100(c)中为 6 个)较多,因此为了实现同一运动轨迹,可以产生无数关节转矩与地面反力的组合。例如,只要让维持 $\theta=\theta_0$ 稳定状态的稳定转矩 u_0 和稳定地面反力 λ_0 满足下式即可,而不必唯一决定:

$$g(\theta_0, 0) = [D | S_0^T] \begin{bmatrix} u_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} \quad (4.135)$$

若在稳定状态 $\theta=\theta_0$ 、 $\dot{\theta}=0$ 、 $u=u_0$ 、 $\lambda=\lambda_0$ 的周围进行线性化,则式(4.133)及式(4.132)成为下式:

$$M_0 \Delta \ddot{\theta} + (C-L) \Delta \dot{\theta} = D \Delta u + S_0^T \Delta \lambda \quad (4.136)$$

$$S_0 \Delta \theta = 0 \quad (4.137)$$

式中,

$$M_0 = M(\theta_0), S_0 = S(\theta_0),$$

$$C = \left. \frac{\partial g}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0}, L = \left. \frac{\partial}{\partial \theta} [S^T(\theta) \lambda] \right|_{\substack{\theta=\theta_0 \\ \lambda=\lambda_0}}$$

由于约束始终成立,因此式(4.137)必须恒成立,所以得到 $S_0 \Delta \dot{\theta} = 0$ 、 $S_0 \Delta \ddot{\theta} = 0$ 。因而,根据式(4.136), $\Delta \lambda$ 由下式求出:

$$\Delta \lambda = [S_0 M_0^{-1} S_0^T]^{-1} S_0 M_0^{-1} \times [(C-L) \Delta \dot{\theta} - D \Delta u] \quad (4.138)$$

将式(4.138)代入式(4.136)中,则得到在 $2n$ 维状态空间中的表达形式如下:

$$\frac{d}{dt} x = \bar{P}(Ax + B\Delta u) \quad (4.139)$$

其中,

$$x = [\Delta \theta^T, \Delta \dot{\theta}^T]^T, \bar{P} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & P \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_0^{-1}(C-L) & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_0^{-1} D \end{bmatrix}$$

$$P = I - M_0^{-1} S_0^T [S_0 M_0^{-1} S_0^T]^{-1} S_0 \quad (4.140)$$

满足约束条件 $S_0 \Delta \theta = 0$ 、 $S_0 \Delta \dot{\theta} = 0$ 的部分空间 W 用下式表示:

$$W = \text{Ker } S, S = \begin{bmatrix} S_0 & 0 \\ 0 & S_0 \end{bmatrix} \quad (4.141)$$

如果该空间 W 中存在初始条件 $x(0)$,那么无论给定何种输入 Δu , $x(t)$ 均被约束在 W 中运动。根据 $PAW \in W$ 及 $PB\Delta u \in W$,这一点是很明显的。

初始条件 $x(0)$ 当然满足 $x(0) \in W$ 。因此,欲研究降维系统,只要仅在 W 中进行即可。降维系统可以由下式给出^[37]:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + B\Delta u \quad (4.142)$$

其中,

$$x = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \hat{x}, Q = [e_1, e_2, \dots, e_{n-r}]$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & I_{n-r} \\ -Q^T P M_0^{-1} (C-L) Q & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q^T P M_0^{-1} D \end{bmatrix}$$

式中, \hat{x} 为降维系统的 $2(n-r)$ 维状态向量; e_1, e_2, \dots, e_{n-r} 为 $\text{Ker } S_0$ 的正交基底。

在双足步行系统中,由于 \hat{A} 、 \hat{B} 满足 $\text{rank} [\hat{B} \hat{A} \hat{B}] = 2(n-r)$,故式(4.142)的系统的闭环固有值可以任意指定。成清等曾通过指定降维系统的固有值来设计控制系统,进行了两腿支撑相的控制实验^[37]。

关于实现两腿支撑相中踢腿动作的动态步行实验问题,采用的是两腿支撑相带约束条件最优调节器的方法,同时对各个关节实施不同的控制(局部反馈模式、自由旋转模式、恒流控制模式等)方法。

古庄纯次 佐野明人

5. WABIAN-RIV 的步行

1972 年,世界上第一台拟人型智能机器人 WABOT-1^[39]问世了,它能实现静态步行,从那以后直至现在,实现实时动态步行一直是研究人员孜孜探求的目标。1984 年,WL-10RD 实现了每步 1.3s 的动态步行^[40],进而它又成功地实现了上下斜面和阶梯。从 1987~1993 年,WL-12 系列被开发出来,它们实现了受未知外力作用下的动态步行,它们通过学习完成步行、跨越障碍物、实现动态步行的转换等^[41~43]。1996 年,拟人型样机 WABIAN^[44]问世,它成功地实现了与人跳舞和动态货物搬运作业。1998 年, WABIAN-R II 实现了带感情表现(喜、悲、怒)的动态步行^[45]。2000 年, WABIAN-RIV 成功地实现了利用声音和视觉的跟踪步行^[46]。

本节介绍有关 WABIAN-RIV 的步行控制问题。WABIAN-RIV 在全长直立静止状态下约高 1.89m, 总质量约 131kg。自由度构成: 下肢单腿 6 个自由度, 躯干 3 个自由度, 上肢单臂 7 个自由度, 单手 3 个自由度, 颈部纵摇轴 2 个自由度, 横摇和偏转轴 2 个自由度, 单眼为纵摇和偏转轴的 2 个自由度, 它共计有 43 个自由度(图 4.101)。

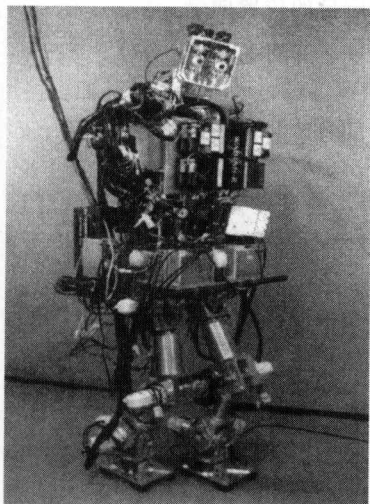


图 4.101 WABIAN-RIV (早稻田大学)

1) WABIAN-RIV 的步行稳定控制

步行稳定控制方式就是借助于腰部和躯体的协调运动来补偿腿部的步行运动和手臂的运动所产生的力矩, 实现稳定步行。稳定步行用的补偿轨迹可按下述求出: ① 双足拟人型机器人建模; ② 计算近似模型的被补偿力矩; ③ 通过重复计算, 计算出力矩补偿轨迹。

首先来研究 WABIAN-RIV 步行轨迹的生成问题。考虑到脚底与路面的着地状态, 以及速度和加速度的连续性, 将踝关节的位置和姿态轨迹用 6 次多项式来表达

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6 \quad (4.143)$$

式中, t 为时间; a_0, a_1, \dots, a_6 为系数。

为了生成光滑的动作, 建立函数 $x(t)$ 时应满足如下 7 个约束条件:

$$\left. \begin{aligned} x(t_0) &= x_0, x(t_f) = x_f, x(t_m) = x_m \\ \dot{x}(t_0) &= \dot{x}(t_f) = 0, \ddot{x}(t_0) = \ddot{x}(t_f) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.144)$$

式中, t_0 为开始时间; t_m 为时间的中点; t_f 为

结束时间。

求解式(4.143), 以满足式(4.144), 从而生成踝关节的位置和姿态轨迹。腰部的位置和姿态, 头部的姿态轨迹也利用 6 次多项式(4.143)一并求出。上肢杆件位置可以根据肩部轨迹利用正运动学计算求出。如果手部轨迹被指定, 那么根据肩部轨迹并利用逆运动学可以计算出上肢杆件的轨迹。

(1) 双足拟人型机器人的建模 根据下肢、上肢、ZMP 轨迹, 推导出计算腰部和躯体补偿轨迹的 ZMP 方程。首先, 对双足拟人型机器人步行系统假定以下的前提条件和坐标设定。

① 双足拟人型机器人由质点集构成。

② 路面坚硬, 无论什么样的力和力矩作用均不产生变形或移动。

③ 设双足步行机器人脚底与路面的着地状况是点着地的集合。

④ 在步行系统与路面的着地点位置, 路面对于旋转(绕 X 轴、Y 轴及 Z 轴)的摩擦系数小到可以忽略。

⑤ 设双足拟人型机器人步行推进力的大小被限于不产生着地点平移(X 轴及 Y 轴)方向滑动的范围内。

如图 4.102 所示, 设定绝对坐标系 $O-XYZ$ (右手坐标系), 在该绝对坐标系 $O-XYZ$ 中, X 轴(与机器人的前进方向一致)和 Y 轴所在的平面与路面一致, 与路面垂直的轴设为 Z 轴。为了研究各个部分的相对运动, 设固定在腰部的运动坐标系为 $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ 。

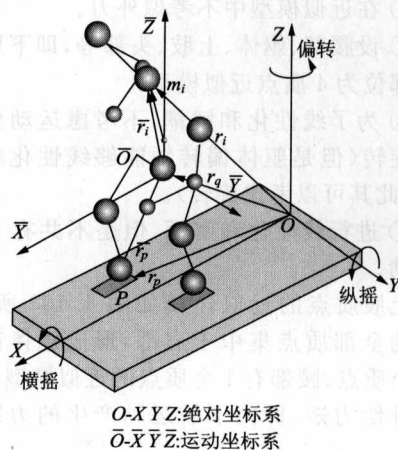


图 4.102 双足拟人型机器人坐标系的设定

根据上述关于步行系统的前提条件和坐标的设定,路面上任意点P的ZMP方程在运动坐标系中用下式表示:

$$\begin{aligned} & \sum_i m_i (\bar{\mathbf{r}}_i - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times [\ddot{\mathbf{r}}_i + \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{G} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_i] \\ & + 2 \bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_i)] \\ & - \sum_j [(\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \times \bar{\mathbf{F}}_j + \bar{\mathbf{M}}_j] = 0 \end{aligned} \quad (4.145)$$

式中, m_i 为质点 i 的质量; $\bar{\mathbf{r}}_i$ 为质点 i 的位置向量; $\bar{\mathbf{r}}_{ZMP}$ 为 ZMP 的位置向量; $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ 为运动坐标系原点的角速度向量; $\ddot{\mathbf{Q}}$ 为相对于绝对坐标系的运动坐标系原点的加速度向量; \mathbf{G} 为重力加速度向量; $\bar{\mathbf{r}}_j$ 为外力作用质点 j 的位置向量; $\bar{\mathbf{F}}_j$ 为作用于质点 j 的外力; $\bar{\mathbf{M}}_j$ 为作用于质点 j 的外力矩。

计算躯体部分和腰部的轨迹,使之满足式(4.145)的ZMP方程。双足拟人型机器人全部关节都是由旋转关节构成的,因此躯体纵摇、横摇、偏转3个自由度产生的该部分质点的运动一般同时具有Z方向的运动,它们彼此之间是耦合的。由此可见,微分方程式(4.145)属于非线性耦合方程,一般很难通过解析方法求出力矩补偿轨迹的精确解。因此,应该先计算力矩补偿轨迹的近似解,再代入它的精确模型,然后将力矩误差反馈并进行存储,通过这样的反复计算,即可以得到力矩补偿轨迹的精确解。

(2) 双足拟人型机器人的近似建模 为了借助于解析方法得到近似解,可按如下所述近似建模。

- ① 在近似模型中不考虑外力。
- ② 设腰部、躯体、上肢、头部等,即下肢以外的部位为4质点近似模型。
- ③ 为了线性化和解耦,不考虑运动坐标系的旋转(但是躯体偏转轴能够线性化和解耦,因此其可以考虑旋转)。
- ④ 进行线性化和解耦,但是不共有Z轴的运动。

上肢质点的近似建模如图4.103所示,上肢的全部质点集中于肩部,形成躯体部分有3个质点、腰部有1个质点的近似模型。设置被补偿力矩,即由下肢运动产生的力矩为 \mathbf{M} ,将式(4.145)的模型近似化得到

$$m_U \bar{\mathbf{r}}_T' \times [\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_T' + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_T' + 2 \bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_T' + \bar{\boldsymbol{\omega}}$$

$$\begin{aligned} & \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_T') + m_T (\bar{\mathbf{r}}_T - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \\ & \times [\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_T + \ddot{\mathbf{Q}} - \mathbf{G} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_T + 2 \bar{\boldsymbol{\omega}} \\ & \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_T + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_T)] + m_W (\bar{\mathbf{r}}_W - \bar{\mathbf{r}}_{ZMP}) \\ & \times [\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_W + \ddot{\mathbf{Q}} - \mathbf{G} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_W + 2 \bar{\boldsymbol{\omega}} \\ & \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_W + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_W)] = -\mathbf{M} \end{aligned} \quad (4.146)$$

式中, m_U 为两上肢质量组的总质量; m_T 为躯体和两上肢质量组的总质量; m_W 为腰部质量组的总质量; $\bar{\mathbf{r}}_T$ 为躯体质量的位置向量; $\bar{\mathbf{r}}_W$ 为腰部质量的位置向量。

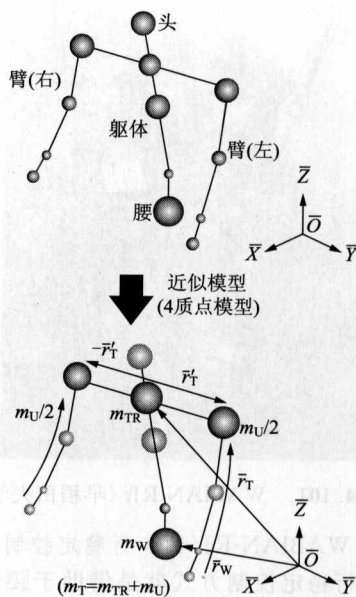


图 4.103 上肢和躯体的近似模型

从运动坐标系旋转而发生的视在力项中可以发现式(4.146)有相互耦合的成分。为了使这些微分方程成为解耦方程,可以假定该视在力引起的力矩并不发生,而且运动坐标系无旋转坐标系。再假定双足拟人型机器人在运动的过程中腰部高度不变,躯体横臂(从躯体中心质点到两个肩部质点的横臂)、腰部横臂(从腰部中心质点到两个腰部端部质点的横臂)在水平面内旋转,躯体部分质点相对于Z轴方向不运动,然后进行线性化和解耦(图4.104)。根据以上的假定,将式(4.146)的左边的已知项向右边移动,形成 \mathbf{M}^* 。然后,将力矩的各个分量分别表示为

$$\begin{aligned} & m_T (\bar{z}_T - \bar{z}_{ZMP}) \ddot{\bar{x}}_T + m_T g_z \bar{x}_T \\ & + m_W (\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP}) \ddot{\bar{x}}_W \\ & + m_W g_z \bar{x}_W = -M_z^* \quad (4.147) \end{aligned}$$

$$m_T g_z \ddot{y}_T + m_T (\ddot{z}_T - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{y}_T + m_W g_z \ddot{y}_W + m_W (\ddot{z}_W - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{y}_W = M_x^*(t) \quad (4.148)$$

$$m_U R^2 \ddot{\theta}_y = -M_z^*(t) \quad (4.149)$$

式中, $\ddot{\theta}_y$ 为躯体部分的偏转轴旋转角加速度。式(4.147)表示纵摇轴的力矩分量, 式(4.148)表示横摇轴的力矩分量, 式(4.149)表示偏转轴的力矩分量。

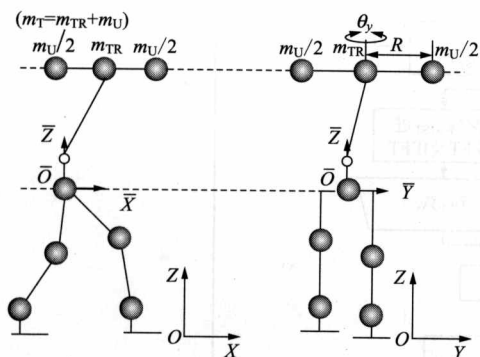


图 4.104 双足拟人型机器人的线性化模型

(3) 近似解的计算 仅仅根据式(4.147)~式(4.149)的3个方程式, 还无法确定 \ddot{x}_T 、 \ddot{x}_W 、 \ddot{y}_T 、 \ddot{y}_W 、 $\ddot{\theta}_y$ 5个补偿轨迹的近似解。若再将近似模型中的被补偿力矩(式(4.147)和式(4.149)的右边)分别分配到腰部和躯体上, 则可以变成下面两组式子:

$$\left. \begin{aligned} m_T (\ddot{z}_T - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{x}_T + m_T g_z \ddot{x}_T &= -M_{y, \text{TRUNK}}^* \\ m_W (\ddot{z}_W - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{x}_W + m_W g_z \ddot{x}_W &= -M_{y, \text{MAIST}}^* \\ \text{其中, } M_{y, \text{TRUNK}}^* + M_{y, \text{MAIST}}^* &= M_y^* \end{aligned} \right\} \quad (4.150)$$

$$\left. \begin{aligned} m_T g_z \ddot{y}_T + m_T (\ddot{z}_T - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{y}_T &= M_{x, \text{TRUNK}}^* \\ m_W g_z \ddot{y}_W + m_W (\ddot{z}_W - \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{y}_W &= M_{x, \text{MAIST}}^* \\ \text{其中, } M_{x, \text{TRUNK}}^* + M_{x, \text{MAIST}}^* &= M_x^* \end{aligned} \right\} \quad (4.151)$$

在式(4.150)及式(4.151)中, 被补偿力矩 $M_{y, \text{TRUNK}}^*$ 、 $M_{y, \text{MAIST}}^*$ 、 $M_{x, \text{TRUNK}}^*$ 、 $M_{x, \text{MAIST}}^*$ 能够根据下肢轨迹和 ZMP 轨迹算出, 属于已知函数, 再假设为稳定步行, 则根据双足拟人型机器人各部分质点和 ZMP 相对于运动坐标系周期性相对运动的规律, 该被补偿力矩应该分别为周期函数, 结果是式(4.150)和式(4.151)的左边同样也属于周期函数。所以, 分别将式(4.150)及式(4.151)的右边进行傅里叶级数展开, 再将躯体纵摇、横摇轨迹分别用未知系数的傅里叶级数表示, 分别代入式

(4.150)及式(4.151)的左边, 比较各两边的傅里叶系数, 即可求得躯体纵摇、横摇轨迹各自的傅里叶系数。然后, 通过逆傅里叶级数展开, 就能够得到围绕纵摇轴、横摇轴的力矩补偿轨迹的近似解。

由于我们假设仅借助躯体运动进行补偿, 因此关于围绕 ZMP 上的偏转轴的力矩补偿轨迹和躯体偏转轴轨迹 θ_y 可以由式(4.149)通过傅里叶系数比较法算出。但是在傅里叶系数中, 有关偏置的项是不定的, 就如纵摇、横摇轨迹的重力项不存在决定初始值的项一样。因此, 关于偏置项需要事先设定, 它应该使稳定部分手臂的摆幅收敛于可动角度范围内。

(4) 反复计算 为了得到力矩补偿轨迹的精确解, 需要反复进行计算。如上所述, 将上述过程所得到的近似解代入精确模型, 即式(4.145)中, 与式子的右边比较, 计算出设定 ZMP 时的力矩误差。将误差符号取反并代入式(4.149)~式(4.151)的右边, 再进行一次计算, 通过多次反复计算, 直到力矩误差小于或等于允许值为止, 此时可以将该结果视为精确解。

以上叙述了稳定步行的求解方法, 至于一般运动, 若运动开始和结束的姿态相同, 则将包含运动始末的一连串运动视为一个运动周期来对待, 将其前后的停止姿态期间设为足够长, 于是同样也完全能够算出力矩补偿轨迹。图 4.105 给出力矩补偿轨迹算法的流程图。

(5) 下肢运动与躯体运动的关系 相对于下肢运动, 躯体运动起到了满足整个步行系统动力学平衡状态的约束运动的作用。为了对它开展研究, 可将躯体运动围绕纵摇轴的力矩平衡方程式(4.148)改写成下式:

$$(\ddot{z}_T + \ddot{z}_{ZMP}) \ddot{y}_T - g \ddot{y}_T = \Phi(t) \quad (4.152)$$

式(4.152)中, $\Phi(t)$ 为式(4.148)的已知项。式(4.152)中的频率传递函数如下式所示:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_T(\omega) &= \frac{2a}{\omega^2 + a^2} b \\ &= \left(\frac{1}{a - j\omega} + \frac{1}{a + j\omega} \right) b \end{aligned} \quad (4.153)$$

其中,

$$a = \sqrt{\frac{g}{(\ddot{z}_T + \ddot{z}_{ZMP})}}, \quad b = -\frac{1}{2g} \sqrt{\frac{g}{(\ddot{z}_T + \ddot{z}_{ZMP})}}$$

由于 $\ddot{y}_T(\omega)$ 的极点位于 ω 的负上半平面,

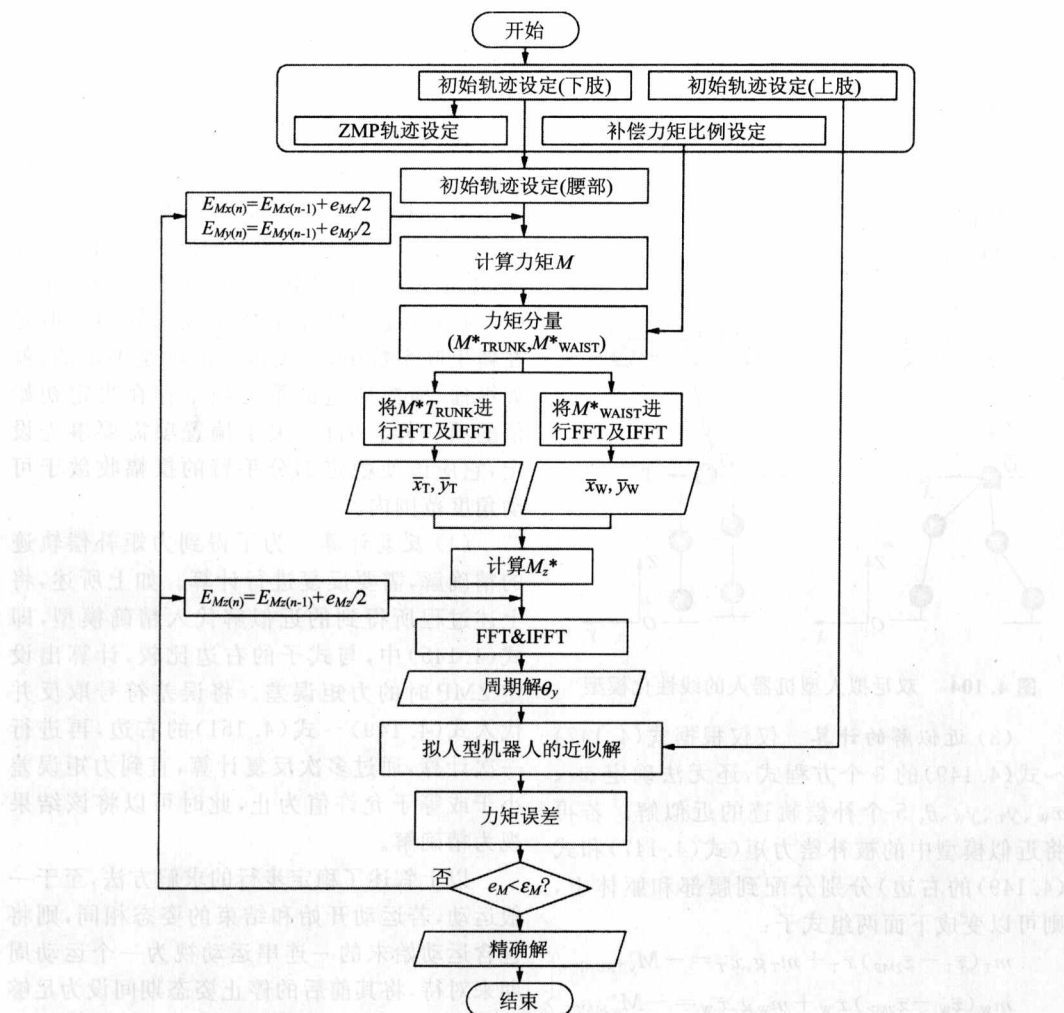


图 4.105 力矩补偿轨迹的计算算法

因此其值在负时域($t < 0$)为非零,即其因果关系不成立。若将式(4.152)作逆傅里叶变换,则得到

$$\bar{y}_T(t) = be^{-a|t|} \quad (4.154)$$

式(4.154)的脉冲响应在负时域为非零。由于强制项的力矩以每一步为周期发生变化,因此可知在一步的前后躯体补偿轨迹都将产生影响。随着步行速度的增加,力矩周期显然将缩短,因此由卷积而产生的对上体轨迹的影响也会相应地、显著地表现出来。

2) 步行模式及控制

由于上述力矩补偿轨迹将导致腰部坐标的变化,可见下肢杆件的轨迹应该根据腰部、脚部轨迹重新进行计算。按照以上步骤求解下肢、上肢、腰部、躯体的轨迹,利用逆运动

学计算各个关节驱动器的角度,从而求解出全部关节驱动器角度的时间序列数据(步行模式)。

将这些步行模式在整个步行周期中,即从步行开始到结束的时间内以某一时间间隔加以分割,算出在该区间中各个关节的目标角度。然后,在双足拟人型机器人的控制计算机内,在一个一个的目标角度之间作直线插补,再从D-A变换器向伺服驱动器发出速度指令值,如此便可以具体地实施步行控制了。

林宪武

6. 小型拟人型 morph: 机构及控制律

为了开展基础技术研究,需要搭建实验研究用的平台。特别是,在拟人型机器人的运动控制中,对于跌倒时的保护动作、站立起

来的动作、全身运动生成等研究,平台具有重要的意义。于是,morph^[47,48]应运而生。作为全身运动控制技术,morph是关于拟人型机器人的关键技术和综合技术,如机器人视觉技术、行动示范型 AI、行动生成等的研究开发平台,它的研制成功基于下述开发理念:①作为系统要求自律性和自立性;②高机动性和坚固性;③高扩展性和可维护性(电气、机构、软件等方面的模块化);④安全性(小型)。

图 4.106 给出拟人型 morph2、morph3 的外形。

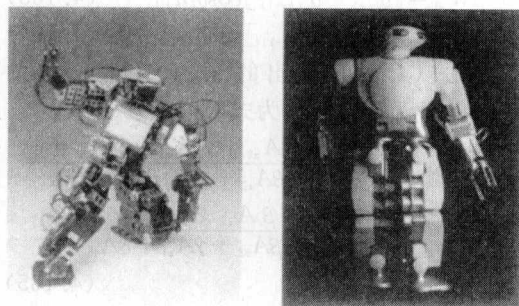


图 4.106 morph2(左)和 morph3(右)的外形
(科学技术振兴机构 北野共生系统计划)

它们的基本规格如表 4.8 所示。

表 4.8 morph 的基本规格

全 长	morph 1:365mm morph 2:340mm morph 3:380mm
质量	morph 1:morph 2:2 000g morph 3:2 400g
连续工作时间	30min
自由度	morph 1,morph 2:26DOF morph 3:30DOF
外部通信设备	Bluetooth

续表 4.8

全 长	morph 1:365mm morph 2:340mm morph 3:380mm
安装 CPU 系统	morph 1,morph 2: 主 CPU:Saga×1 (PowerPC-603, 200 MHz, RAM: 64 MB, FlashROM: 8 MB) 副 CPU:Catena×10 morph 3: 主 CPU:ATOM×1 (VR 5500, 400 MHz, RAM: 64 MB, FlashROM: 16 MB) 副 CPU:Morpheus×13
搭载传感器	morph3:111 个 (触觉传感器、温度传感器、力觉传感器、电流传感器、COM 传感器等)

图 4.107 所示为 morph 的控制系统方框图。它主要由基准步态和动作生成器(产生机器人目标动作和步态),以及实时 ZMP 补偿器(进行动作补偿)构成。

双足拟人型步行机器人最突出的机动性能是能够在踏脚石一类不平稳的地面上移动,以及使用全身实现跨越动作等。以这样的动作为前提,运动补偿器必须符合的条件是不改变规划的目标关节角度轨迹,而能满足 ZMP 的稳定性。morph 上的实时 ZMP 补偿器^[49]采用控制各个关节角加速度而非改变角度轨迹的方法来实现 ZMP 补偿。下面引用一个具体的例子来对它作简要的说明。

首先,假设机器人处于 sagittal plane 的运动中,ZMP 在前进方向与目标值之间产生误差。在这种情况下,补偿 ZMP 的动作可以让机器人的动作向前方加速,从而产生向后的惯性力,使 ZMP 后移。图 4.108 给出采样时间为 T_s 的机器人某一个关节的角度轨迹。

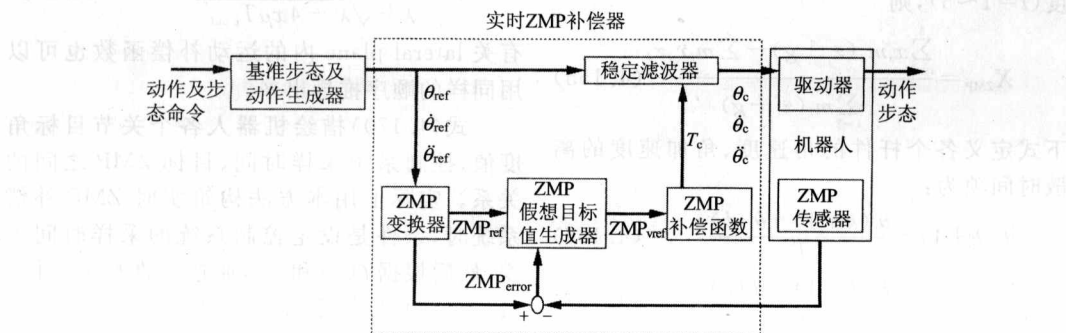


图 4.107 morph 运动和步行控制系统方框图

如图 4.108 所示,本方法假想使各个姿态的采样间隔伸缩,实现机器人本体的加速动作,使机器人产生惯性力。结果通过操作 ZMP 的值,使其接近目标值。该方法也可以说是仅仅控制间接角度轨迹上的移动速度。可见,本方法的特点在于既实现了 ZMP 补偿,又不改变运动轨迹,做到这两个方面的兼顾。以下,我们将该采样间隔的假想值称为惯性力操作参数 T_c 。

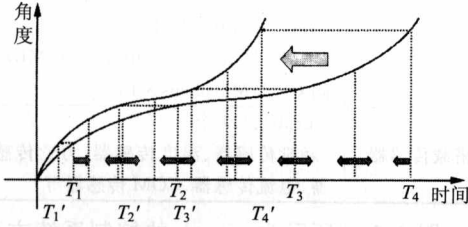


图 4.108 补偿方法中 ZMP 补偿与目标关节角度值的关系

实时 ZMP 补偿器由 ZMP 假想目标值生成器、ZMP 补偿函数、稳定滤波器构成。ZMP 假想目标值生成器由 ZMP 目标值与 ZMP 误差(即 ZMPerror),生成 ZMP 假想目标值 ZMP_{vref} 。ZMP 补偿函数的作用是计算使 ZMP 的实测值收敛于该 ZMP_{vref} 值而控制系统所必需的假想采样时间 T_c 。根据该 T_c 值,利用稳定滤波器重新计算机器人各个关节的目标角度向量,进行 ZMP 补偿。以下,对于 ZMP 补偿函数进行说明。

以 Sagittal Plane 内(X-Z 坐标系)的 5 杆件模型为例。在此,系统的参数按照如下所定义:

l_i 为到杆件的重心的距离($i=1\sim5$); m_i 为杆件的质量($i=1\sim5$); $\theta_i(k)$ 为杆件 i 与垂直轴的相对角度($i=1\sim5$); L_i 为杆件 i 的长度($i=1\sim5$),则

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^5 x_i m_i (z_i + g) - \sum_{i=1}^5 m_i \ddot{x}_i z_i}{\sum_{i=1}^5 m_i (z_i + g)} \quad (4.155)$$

下式定义各个杆件的角速度、角加速度的离散时间项为:

$$\dot{\theta}_i(k+1) = \frac{\theta_i(k+1) - \theta_i(k)}{T_c} \quad (4.156)$$

$$\dot{\theta}_i(k+1) = \frac{\theta_i(k+1) - \theta_i(k)}{T_c} \quad (4.157)$$

$$\dot{\theta}_i(k) = \frac{\theta_i(k) - \theta_i(k-1)}{T_{c\text{ old}}} \quad (4.158)$$

再规定下式:

$$A_{xi} = V_{xi} \frac{1}{T_c^2} - W_{zi} \frac{1}{T_{c\text{ old}} T_c} \quad (4.159)$$

$$A_{zi} = V_{zi} \frac{1}{T_c^2} - W_{zi} \frac{1}{T_{c\text{ old}} T_c} \quad (4.160)$$

式中,各项如下式所示:

$$V_{xi} = [\theta_i(k+1) - \theta_i(k)] \cos \theta_{i(k+1)} - [\theta_i^2(k+1) + \theta_i^2(k) - 2\theta_i(k+1)\theta_i(k)] \sin \theta_{i(k+1)} \quad (4.161)$$

$$V_{zi} = [\theta_i(k+1) - \theta_i(k)] \sin \theta_{i(k+1)} + [\theta_i^2(k+1) + \theta_i^2(k) - 2\theta_i(k+1)\theta_i(k)] \cos \theta_{i(k+1)} \quad (4.162)$$

$$W_{xi} = [\theta_i(k) - \theta_i(k-1)] \cos \theta_{i(k+1)} \quad (4.163)$$

$$W_{zi} = [\theta_i(k) - \theta_i(k-1)] \sin \theta_{i(k+1)} \quad (4.164)$$

于是,式(4.155)给出的 sagittal plane 内的 ZMP: X_{ZMP} 可以改写为式(4.165):

$$X_{ZMP} = \frac{\alpha_x A_{z1} + \beta_x A_{z2} + \gamma_x A_{z4} + \delta_x A_{z5} + \epsilon_x}{\alpha A_{z1} + \beta A_{z2} + \gamma A_{z4} + \delta A_{z5} + \epsilon} - \frac{\alpha_x A_{x1} + \beta_x A_{x2} + \gamma_x A_{x4} + \delta_x A_{x5}}{\alpha A_{z1} + \beta A_{z2} + \gamma A_{z4} + \delta A_{z5} + \epsilon} \quad (4.165)$$

式(4.165)中,引入下式:

$$\chi = (\alpha_x - \alpha X_{ZMP}) V_{z1} + (\beta_x - \beta X_{ZMP}) V_{z2} + (\gamma_x - \gamma X_{ZMP}) V_{z4} + (\delta_x - \delta X_{ZMP}) V_{z5} - \alpha_x V_{x1} - \beta_x V_{x2} - \gamma_x V_{x4} - \delta_x V_{x5} \quad (4.166)$$

$$\lambda = (\alpha_x - \alpha X_{ZMP}) W_{z1} + (\beta_x - \beta X_{ZMP}) W_{z2} + (\gamma_x - \gamma X_{ZMP}) W_{z4} + (\delta_x - \delta X_{ZMP}) W_{z5} - \alpha_x W_{x1} - \beta_x W_{x2} - \gamma_x W_{x4} - \delta_x W_{x5} \quad (4.167)$$

$$\mu = \epsilon_x - \epsilon X_{ZMP} \quad (4.168)$$

于是,得到下式:

$$\chi = \frac{1}{T_c^2} - \lambda \frac{1}{T_{c\text{ old}}} \cdot \frac{1}{T_c} + \mu \quad (4.169)$$

根据式(4.169),补偿函数可用下式表示:

$$T_c = \frac{2\chi T_{c\text{ old}}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\chi\mu T_{c\text{ old}}^2}} \quad (4.170)$$

有关 lateral plane 内的运动补偿函数也可以用同样的顺序推导出来。

式(4.170)描绘机器人各个关节目标角度值、控制系统采样时间、目标 ZMP 之间的关系。实际上用本方法构筑实时 ZMP 补偿系统时,条件是设定控制系统的采样时间不变,然后根据 $\theta(k)$ 和 T_c 通过线性插补,计算目标关节角度指令值 $\theta(k+1)$ 。

图 4.109 给出了用上述补偿方法得到的机器人踏步运动稳定阶段的仿真结果。在该

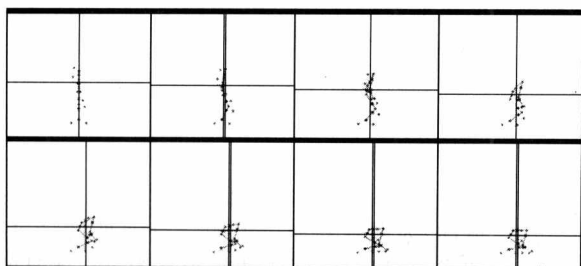


图 4.111 机器人前滚翻动作的 ZMP 及各个杆件的状态

实验中, ZMP_{vref} 采用下式的 P 控制律, G 为 ZMP 误差的反馈增益。

$$ZMP_{vref} = ZMP_{ref} + G \cdot ZMP_{error}$$

在这个仿真中, 假设运动是在 lateral plane 内的动态踏步动作, 它验证了运动开始

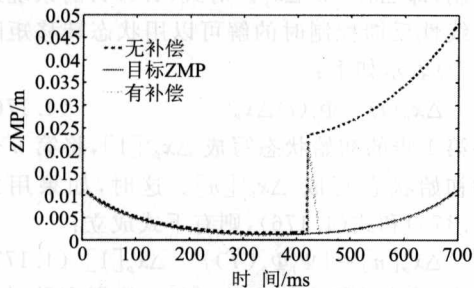


图 4.109 踏步运动中 ZMP 的轨迹(仿真实验)

经过 0.42s 之后加上干扰时的 ZMP 轨迹。由图 4.109 可知, 由于采取了本补偿措施, 实际 ZMP 轨迹瞬时收敛于目标 ZMP。图 4.110 所示为让实际机器人样机进行同样踏步运动的补偿实验结果。与仿真实验相同, 证明本补偿方法是有效的。

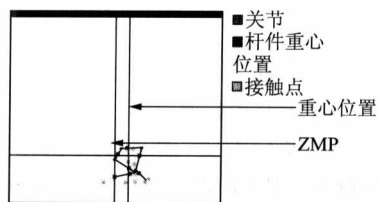
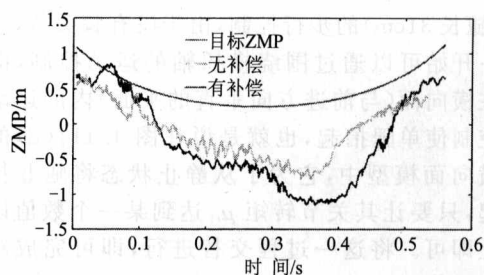


图 4.112 仿真画面内符号的定义

图 4.110 踏步运动中的 ZMP 轨迹
(实际样机实验)

本补偿方法也可以用于对全身的运动稳定控制。在这里, 以机器人使用全身进行前翻动作的情况为例进行说明。在这种情况下, 必须以覆盖机器人各种姿态的突出部分的多面体为对象加以考虑, 在该多面体与地面的接触面内保证 ZMP 稳定。图 4.111 给出未采用补偿法时机器人前滚翻运动的姿态和 ZMP 位置的仿真结果。图 4.112 给出仿真画面的符号定义。图 4.113 描绘出用离线仿真生成的机器人全身运动时各个关节角度的轨迹对机器人实际样机进行前翻滚运动时

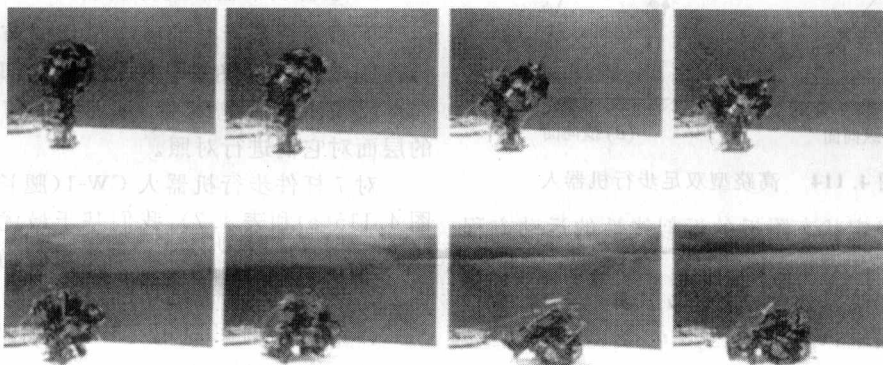


图 4.113 有 ZMP 补偿的前滚翻动作

的连续动作照片。

图 4.111 和图 4.113 显示了本补偿方法对生成机器人全身运动模式时的有效性。

古田贵之

7. 高跷型双足步行机器人

高跷型步行是一种能充分反映人类步行特征的步行方式,图 4.114 所示为双足步行机器人 BIPER-3(3 个自由度)和 BIPER-4(7 个自由度),它们不需要踝关节转矩即可实现三维动态步行^[50,51]。本小节介绍 BIPER-3(腿长 31cm)的步行控制,由于没有膝关节,它一开始可以通过围绕横摇轴的运动控制,即在横直面(与前进方向垂直的平面)内的运动控制使单腿抬起,也就是说在图 4.114(d)的横直面模型中,它为了从静止状态将腿 II 抬起,只要让其关节转矩 μ_{r1} 达到某一个数值以上即可。将这一过程交替进行,即可完成踏步动作。

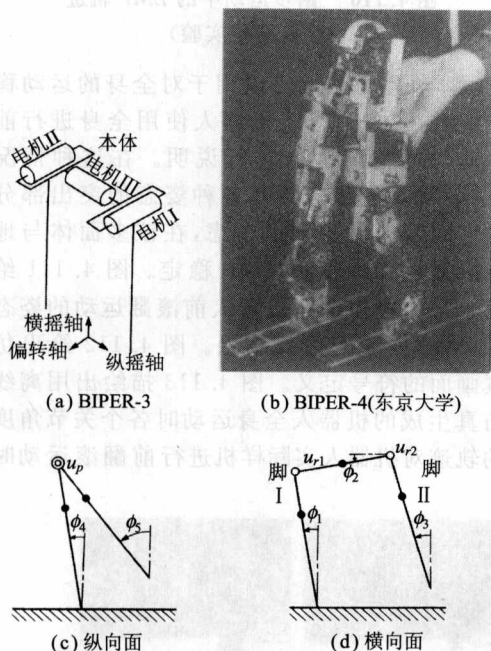


图 4.114 高跷型双足步行机器人

在稳定状态附近的近似线性的运动方程式可用下式表示:

$$\text{横摇轴: } \dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r + \mathbf{E} \quad (4.171)$$

$$\text{纵横轴: } \dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p \quad (4.172)$$

其中,

$$\mathbf{x}_r = [\phi_1, \phi_1, \phi_2, \phi_2, \phi_3, \phi_3]^T$$

$$\mathbf{u}_r = [u_{r1}, u_{r2}]^T$$

$$\mathbf{x}_p = [\phi_4, \phi_4, \phi_5, \phi_5]^T$$

横摇轴表示式(4.171)中的 \mathbf{E} 为重力补偿项。

至于支撑腿的转换过程,可以用下式表示:

$$\mathbf{x}_r^i = \Psi_r \mathbf{x}_r^f, \quad \mathbf{x}_p^i = \Psi_p \mathbf{x}_p^f \quad (4.173)$$

式中,上角标 i 为支撑腿转换后瞬间; f 为支撑腿转换前瞬间。

下面以围绕纵摇轴的运动(纵向面内的运动)为例对其加以说明。设满足式(4.172)和式(4.173)条件的期望步态为 \mathbf{x}_p^* , 此时的输入为 \mathbf{u}_p^* , 期望步态的偏离值为 $\Delta \mathbf{x}_p$ 、 $\Delta \mathbf{u}_p$ 。这时,式(4.172)和式(4.173)可改写为下列形式:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_p \Delta \mathbf{u}_p \quad (4.174)$$

$$\Delta \mathbf{x}_p^i = \Psi_p \Delta \mathbf{x}_p^f \quad (4.175)$$

在 BIPER-3 的控制中, $\Delta \mathbf{u}_p$ 为线性反馈控制,即 $\Delta \mathbf{u}_p = \mathbf{k}^T \Delta \mathbf{x}_p$ 。对式(4.174)的系统进行线性反馈控制时的解可以用状态转移矩阵 $\Phi_p(t)$ 表示如下:

$$\Delta \mathbf{x}_p(t) = \Phi_p(t) \Delta \mathbf{x}_p^i \quad (4.176)$$

将第 1 步的初始状态写成 $\Delta \mathbf{x}_p^i[1]$, 将第 n 步的初始状态写成 $\Delta \mathbf{x}_p^i[n]$ 。这时,如果用式(4.175)和式(4.176),则有下列式成立:

$$\Delta \mathbf{x}_p^i[n] = \{\Psi_p \Phi_p(T)\}^{n-1} \Delta \mathbf{x}_p^i[1] \quad (4.177)$$

式中, T 为单腿支撑相的时间。根据离散时间系统理论可知,如果 $\Psi_p \Phi_p(T)$ 特征值的绝对值均小于 1, 则 $\Delta \mathbf{x}_p^i[n] \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$ 。这就意味着,即使由于某种外界干扰而造成了偏离稳定轨迹 \mathbf{x}_p^* 的现象,经过足够长的时间也能返回到稳定轨迹上来。对于横摇轴的控制同样可以采用上述相同的做法,从而完成了 1s 约走 4 步,即步行周期很短的动态步行实验。

8. 最优调节器和局部反馈

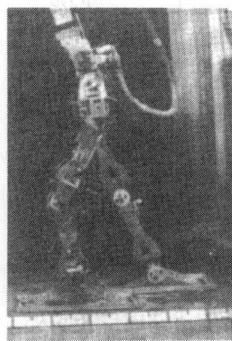
下面介绍基于全部状态最优调节器的步行控制试验和仅仅基于各个关节局部信息的局部反馈步行控制实验,并从反馈信息利用的层面它们进行对照。

对 7 杆件步行机器人 CW-1(腿长 60cm, 图 4.115(a)和表 4.7), 我们基于最优调节器理论进行了步行实验^[52]。当支撑腿尚未从地面上抬起,摆动腿踝关节始终保持与地面水平状态时, CW-1 可以用 5 杆件模型来表示。为了在 CW-1 的控制中采用最优调节器的方法,在一步区间内设置了若干个目标值(稳定状态) θ , 如图 4.115(b)所示。从式(4.133)中

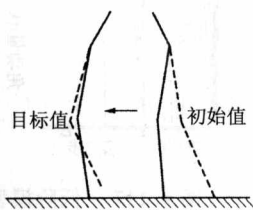
可知,保持该目标值所需要的输入转矩 u 就是 $D^{-1}g(\bar{\theta}, 0)$, 它用反馈控制的形式由下式给出:

$$u = -K \begin{bmatrix} \bar{\theta} - \bar{\theta} \\ \dot{\bar{\theta}} \end{bmatrix} + u \quad (4.178)$$

反馈系数 K 应根据最优调节器理论选定。通过将目标值 $\bar{\theta}$ 接连不断地转换,当步长为 20cm 时,每步约 1s;步长为 30cm 时,每步约 2s。



(a) CW-1(千叶大学)



(b) 初始值和目标值

图 4.115 现代控制理论的控制方法

另外,针对 5 杆件的健脚 1 型双足步行机器人(腿长 64cm,表 4.7)采用了来自各个关节的局部高增益位置反馈,并完成了二维动态步行实验^[53]。健脚 1 型的脚底是一根横向管,没有踝关节,因此不可能利用踝关节转矩来加速或减速。在这种方式的步行控制中,预先应该求解出各个关节的目标函数,然后每隔一个阶段重复给出这些函数,从而能够完成稳步步行。所得到的步行结果为每步 0.4~0.45s,步长约为 30cm,平均步速为 0.7~0.8m/s,对于机器人实现步行来说,这

个速度算是够快的了。

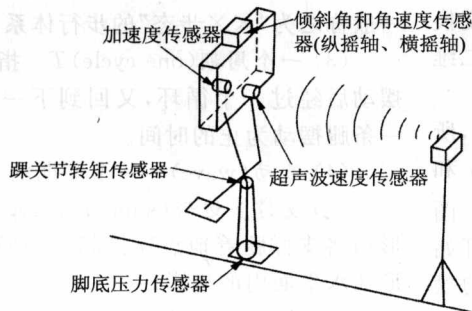
由于采用了高增益的局部位置反馈,结果参数变化或外部干扰产生的影响很小,基本上实现了给定的关节轨迹。还要指出的是,在生物控制中实际上也存在局部反馈现象,所以它是一种有效的控制方法,但是若将局部位置反馈用于支撑腿踝关节的控制,就会出现脚底抬起等问题。所以,在 BLR-G2(腿长 54cm,图 4.116 和表 4.7)中采用了另外一种控制方式^[54]来代替,即对驱动踝关节和脚底外侧的驱动器实施力反馈控制,利用各种传感器信息(图 4.116(a))来决定加在力闭环上的力目标值。这里的控制量是步行系统的角动量,至于其他关节,则全部进行局部位置反馈。这种控制方式实现了步长为 35cm、每步约为 1.0s 的三维动态步行实验。

9. 其他各种控制方法

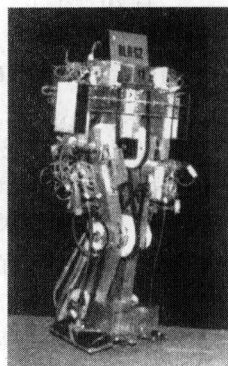
如表 4.7 所示,步行机器人的控制还有其他各种方法,例如 IDATEN-2 号的步行采用了学习控制方式,BIPMAN 的步行采用了 Van der Pol 方程式来产生它的步行模式^[55,56]。梶田等人提出让步行机器人重心沿位能守恒轨迹的控制方案^[57]。MEG-2 与其他步行机器人不同,它只用了 1 台电机,通过驱动复杂的连杆机构实现了步行^[58]。

10. 低阶模型

步行系统过于复杂,许多研究都在寻找低阶模型讨论步行力学问题的途径,如倒立摆模型、忽略腿部质量模型^[59~61]等。不过,尽管这些模型在定性分析中表现出一定的有效



(a) 传感器系统



(b) BLR-G3(岐阜大学)

图 4.116 基于传感器信息的控制

性,但是由于它们与原高阶模型之间不存在定量关系,因此并不适合用于控制。下面分别用不同的方法推导两种与原高阶模型(运动方程式)存在定量关系的低阶模型。

首先,根据奇异摄动法,在步行系统低速状态下的解可以由下面的微分方程和代数方程式求出^[62,63]:

$$\dot{\xi}_1 = \lambda^2 \xi_1 + bu_1 \quad (4.179)$$

$$V_2^T (-CV\xi + Du) = 0 \quad (4.180)$$

其中,

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = V^T \theta, \quad (4.181)$$

$$V = [v_1, V_2]$$

式中, θ 为 n 维关节角度向量; u 为输入转矩向量; V^T 为坐标变换矩阵; v_1 为 $n \times 1$ 矩阵; V_2 为 $n \times (n-1)$ 的矩阵; C 为重力项线性化处理的系数矩阵; D 为输入矩阵。式(4.179)表示支撑腿踝关节仅输入转矩为 u_1 时的倒立摆。为了以低速模式的解近似真解,需要提取高速运动微分方程式所具有的稳定的解。因为提取的高速运动微分方程式是可控的,所以利用适当的线性反馈能够保持系统的稳定性。

另外一种方法是在支撑腿踝关节以外的各个关节进行局部反馈控制的条件下,利用两个主特征值 λ_1 和 λ_2 导出低阶模型^[64]如下:

$$\dot{\eta}_1 = \Lambda_1 \eta_1 + \Gamma_1 \theta + du_1 \quad (4.182)$$

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \approx U^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ -\Lambda_2^{-1} \Gamma_2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.183)$$

其中,

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad \Lambda_2 = \begin{bmatrix} \lambda_3 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_{2n} \end{bmatrix}$$

式中, θ 为关节角度目标向量; U 为坐标变换矩阵; η_1 为与主特征值 λ_1, λ_2 对应状态的二维向量; $\lambda_3, \dots, \lambda_{2n}$ 为快速响应特征值。

主特征值 λ_1 和 λ_2 对应于倒立摆方式,所以式(4.182)表示以支撑腿踝关节转矩 u_1 和关节角度目标向量 $\dot{\theta}$ 为输入的倒立摆。图 4.117(a)给出了从垂直站立的静止状态开始的步行仿真结果,此时利用摆动腿向前的摆动使重心前移,而非踝关节转矩。图 4.117(b)给出了上述情况对应的角动量变化。从图 4.117 中可以看出,5 杆件模型和低阶模型

是相当一致的。

上面给出的低阶模型可用来分析步行的稳定性,它与原高阶模型所得到的结果十分近似^[65]。由于步行系统相当复杂,所以它的控制结构要采用分层方式。总之,理想低阶模型的开发是一个重要的课题。

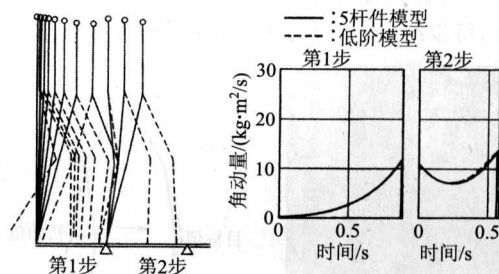


图 4.117 低阶模型和高阶模型比较

古田贵之 林 宪玉 古庄纯次 佐野明人

4.4 多足机器人的机构和控制

多足机器人主要用作四足和四足以上的有足机器人的总称,由于本小节与其他章节有关,因此需要对除双足以外的其他有足机器人做综合的、简要的说明。

4.4.1 术语

将多足机器人的术语中使用频率高的术语整理如下:

(1) 支撑相(support phase)和摆动相(swing phase)^[13] 腿部着地的状态被称为支撑相(或站立相),腿部腾空的状态被称为摆动相(或复位相)。

(2) 步态(gait) 根据摆动腿的顺序和时序,多足机器人的步行方法有各种分类方法,一般称之为“ $\times \times$ 步态”的步行体系。

(3) 一个周期(one cycle) T 指某一条腿摆动后经过一个循环,又回到下一次使用同一条腿摆动为止的时间。

(4) 波动(wave) 一个周期的一半。

(5) 支撑多边形(support polygon) 用凸形边将支撑腿着地点连接起来构成的凸多边形在水平面内的投影。

(6) 占空系数(duty factor) β ^[14] 用一个周期的时间去除一个周期中支撑相的时间所得到的值,它的取值在 0~1 之间。

(7) 腿相位(leg phase) ϕ_i 将腿 i 开始摆动位置的时间与一个周期的时间相比得到的比值称为 i 的腿相位 ϕ_i ($0 \leq \phi_i < 1$)。

(8) 步幅(stride length) d 腿的一个周期的运动被称为步(stride),绝对坐标系中重心在每周期前进的距离称为步幅。

(9) 行程(stroke) λ ^[14] 从躯体坐标系观察,摆动腿单腿的复位距离。在重心持续运动的步态(例如,四足爬行步态)中,行程 λ 与步幅 d 之间有 $\lambda = \beta d$ 的关系。

(10) 腿部可动范围(leg workspace) 从躯体坐标系观察,步行机械单腿部运动的机构约束范围。它原来应该用三维来表示,但为了简单起见,多将它向水平面或躯体平行的着地面进行投影,结果变成在二维平面来表示了。

(11) 基准腿部轨迹(standard foot trajectory) 指当有足机器人的躯体姿态和移动环境保持不变的条件下,考虑稳定性和移动效率的立场从支撑腿相周期性地跟踪腿部的轨迹。

(12) 纵向稳定余量(longitudinal stability margin) 在图4.131(a)介绍的稳定余量中,沿重心移动轨迹得到的两个距离中的较短者被称为纵向稳定余量。

(13) ZMP(zero moment point)^[23] 当围绕某作用点的全部支撑腿所受的着地力的力矩之和为零时,将满足这样条件的着地面上的点称为ZMP,在包含动态效果的步态设计时使用这个概念(图4.118)。可以将它视为在平地上定义的动态重心的投影点,其稳定条件是在支撑多边形内存在ZMP。由于利用ZMP判别稳定性时有以下几点限制,因此上述定义不适合所有不平整地面:①若着地点不位于同一个着地面上,故无法定义ZMP应该落入平面中;②垂直反力的方向因着地点的不同而不同时,不能将力分解为水平和

垂直分量;③由于摩擦被忽略,因此不适合借助于摩擦力支撑自重的场合^[15]。

(14) 斜行角(crab angle) α ^[24] 躯体坐标系定义的正面方向(x 方向)与实际前进方向的夹角。

(15) 规则步态(regular gait) 所有的腿以相同的占空系数移动的步行方法。

(16) 对称步态(symmetric gait) 左右一对腿部相互之间相对于前进方向具有腿相位 $1/2$ 的步行方法。

(17) 基准步态(standard gait) 每隔一定周期支撑腿重复跟踪基准腿部轨迹的步态。

(18) 自适应步态(free gait) 不具有周期性的模式,摆动腿的顺序和时间由移动环境随机生成的步态。

4.4.2 移动方式的分类

可以根据力学观点,将多足机器人中常见的移动方式分类如下^[2]:

(1) 静态步行(static walk) 这是一种始终保持静态稳定性的步行方式。实现这种步行方式时,将多足机器人的重心沿铅垂方向向下对着地面投影,投影点(重心投影点)应该位于连接支撑腿着地点形成的多边形内部。若不考虑脚掌面积,那么多足机器人始终应该有3足或3足以上着地步行。

(2) 准动态步行(quasi-dynamic walk) 在静态步行中存在有取得动态性平衡的期间,也有时称之为动态性步行。

(3) 动态步行(dynamic walk) 始终保持动态性平衡的步行。一面以单腿或双腿着地,一面移动,为此需要通过重心控制,使重力和惯性力的合力向量通过支撑腿着地点或连接两个支撑腿着地点的线段上。

(4) 跑跳(running) 以快速移动为目的,出现所有腿都离开着地面的相的移动方式。由于离开着地面后,机器人重心的轨迹不再受控,因此为了实现稳定着地,必须对离开地面后围绕重心的旋转运动实施控制,达到姿态的稳定。为了实现跑跳,驱动器应该比步行具有更高的输出/重量比。

(5) 跳跃(jumping, hopping) 所有腿同时从着地面踢腿,同时着地的移动方式。至

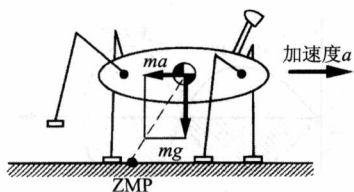


图 4.118 ZMP 的定义

今它主要用于单足机器人的移动方式。即使同样是跳跃也有区别,人们习惯将尽可能大的一次性跳跃称为 jumping,而将连续小步幅的跳跃称为 hopping^[3]。

4.4.3 腿数与移动方式的关系

腿数最少的移动形态是单足机器人。即使增大单足机器人脚掌的面积,实际上也不可能在移动的同时保持它的静态稳定性,因此它不得不采取边跳跃边移动的形式。在自然界中,通常不存在这样的移动形态,不过小鸟、袋鼠将两肢夹住进行跳跃,本质上可以看作是属于单腿运动^[2]。用两腿以上交替动作来做跑跳的动物,也可以将其视为单腿跳跃的组合,因此有关这些跳跃的研究均在进行中,它们都与跑跳控制的基础理论相关^[4]。

在脚掌着地的前提下,能够维持静态稳定性的最少支撑腿数为3,因此实现静态步行需要四足或四足以上的腿数。自然界中,六足昆虫就是边将重心投影点保持在支撑腿三角形内部,边每次交替三条腿摆动,以这样简单的模式来实现静态步行的^[1]。与此相比,四足的静态步行稳定性有所降低,摆动腿的顺序和时间安排比较复杂。尽管如此,绝大多数的爬虫类、哺乳类动物都选择了四足,理由也许在于四足比六足体重轻,而且每条腿的可动范围和行程长度都得到了扩大,有利于提高移动速度。不过,对于小而轻的昆虫而言,腿数的增加并不会造成太大的能量消耗,所以六足静态步行成为其理想的形态,而且步行算法大大简化,即使不具备高级智能也无妨。

多足机器人可选择不同的腿数,而与尺寸全然无关,但一般认为,四足机器人在减轻硬件质量和高速移动性方面占有优势;反之,六足机器人在稳定性和算法简化方面占有优势。人们还开发了以蜘蛛、章鱼、墨鱼等为参考的仿生型机器人,甚至开发出自然界中并不存在的奇数腿机器人。

4.4.4 设计概念

多足机器人需要采用较多的驱动器,因此重要的问题是如何提高步行中的能量效率和驱动器的运转率,这涉及机构和步态方面

的设计。在本小节中将介绍几个具体的设计概念。

1. 移动功率^[39]

无论水平面或壁面,作为统一评价移动体能量效率的指标有移动功率(specific resistance) ϵ 。

$$\epsilon = \frac{\text{移动所需要的能量}}{\text{移动体质量} \times \text{移动距离}}$$

移动功率的值越小,意味着移动效率越高,在移动所需要的能量与移动前后的位能之差相等时,为最小值,例如在水平面该值为0,在垂直面该值为1。

2. GDA^[40]

下面说明多足机器人在步行中消耗位能时的现象。

图4.119的多足机器人忽略了腿部质量,它一面用腿支撑自重,一面作水平等速运动。为了用躯体坐标系描述运动,图4.119中腿部一面受到地面反力的作用,一面滑动。图4.120为该动作期间腰关节、膝关节驱动器产生的功率。它由支撑自重的围绕关节的转矩与该关节的角速度乘积求得。图4.119中的腿部末端在AB之间和BC之间输出的功率有正、负符号变化。但是无论处于何种状态,两个驱动器生成的功率之和始终为零。

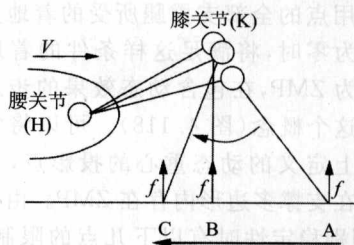


图 4.119 消耗负能量的腿部运动

若用普通的驱动器驱动腿部轨迹,而非再生制动器,则图4.120中负功率区域的能

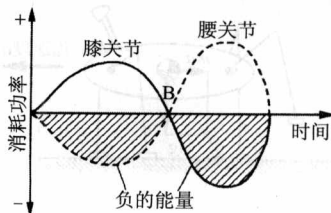


图 4.120 消耗功率的变化

量将以热量的形式被消耗掉。应该指出,即使一些运动在理论上不需要能量(例如,摆动无质量腿并使躯体水平等速移动),但是在实际上仍需要较大的能量损耗。

这样的现象称为负位能损耗,不过如图 4.121(a)所示,如果将腿部机构分解为重力方向的驱动系统和与之垂直方向的驱动系统,就能够避免这种损耗的发生。但是,垂直方向的驱动器需要相当大的减速比,或者设计自锁机构。在步行中,当腿部支撑住自重之后,自锁机构将垂直方向的驱动器锁住,仅靠水平方向的驱动器推动躯体前进,因此自锁机构不会产生负功率,能够避免上述问题。广濑等提出这样的方法,称之为 GDA(Gravitationally Decoupled Actuation)。图 4.121(b)的缩放式结构也具有同样的效果。

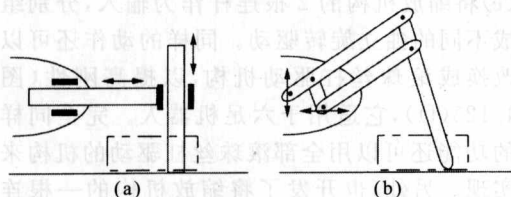


图 4.121 防止负的能量消耗的 2D 机构

3. 耦合驱动^[43]

GDA 的本质在于让多足机器人沿水平方向等速移动躯体重心作业时消耗的功率为零。为了使驱动器不消耗负的功率,设计时应该使重力方向驱动和与其垂直方向的驱动各自独立,互不耦合(图 4.122(a))。与此不同的是,在克服重力运动的壁面移动场合,由于移动本身必须具有强大的功率,因此通常并不产生负功率,不必担心会发生驱动系统耦合、功率损耗加大、移动功率增加的问题。

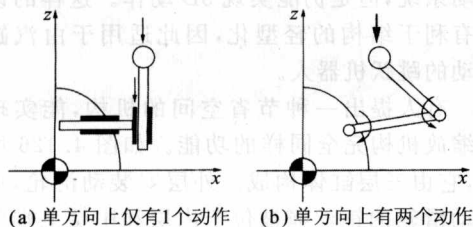


图 4.122 多驱动器耦合驱动增大输出

在耦合驱动(coupled drive)中,与其减轻驱动系统和机器人本体的质量,还不如提高

其承载性能。因此,广濑等提出了所谓耦合驱动的设计概念。它的含义是让所有驱动器相互耦合,共同驱动,达到驱动器运转率的最大化(图 4.122(b))。一般来说,同种驱动器的输出重量比是近似一定的。因此,在解耦驱动系统中,不得不让各个驱动器单独输出移动所需要的功率,结果导致各自由度驱动器质量增加。如果驱动器能够分担所需运动的输出,那么当然也就减轻了每个驱动器的质量。图 4.123 为按照这个概念开发的、驱动器耦合的壁面爬行腿部机构的例子^[47]。

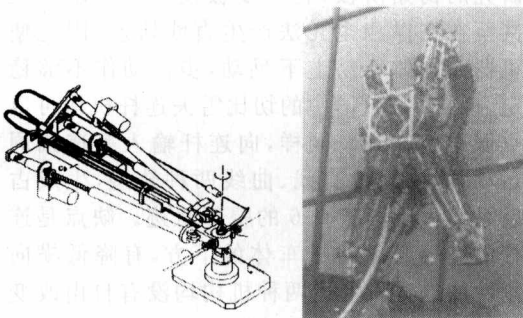


图 4.123 三维耦合驱动壁面移动机构
(左)和 NINJA-1C(东京工业大学)

为了在平地、倾斜地面、壁面的三维粗糙地面上运动,有川等提出在多足机器人设计中采用 GDA 与耦合驱动融合的方法^[46]。

4. 支撑相和摆动相的变速机构

在腿部的一个周期的运动,特别是垂直方向的运动中存在着两种不同的运动模式,即支撑相和摆动相。前者仅要求较大的支撑自重的力,对于速度的要求较低。后者正好相反,要求使腿摆动的力不大,但要求速度较高。多足机器人在移动过程中不断地在这两种模式之间高速转换。转换的方法是将驱动系统减速器的减速比设计成负载敏感型。至今分为两种实现的途径,即无级变速器的方法和两级变速器的方法^[41]。

5. 节省自由度的腿部机构

为了让多足机器人独立驱动的各条腿实现三维空间移动,通常需要的驱动器数等于 $3 \times$ 腿数。实际上这样并非理想的选择,因为驱动器数的增加意味着质量的增加。比较有效的办法是采用节省自由度的腿部机构(reduced d. o. f's arrangement),即按照满足移动

目标所需的最低运动自由度设计即可,以减少驱动器数量,减轻机器人的质量。

4.4.5 腿部机构

多足机器人在一个周期中交替出现的支撑相和摆动相,不仅其动作特性不同,描绘的轨迹也有区别。支撑相中主要描绘直线运动,而摆动相中主要描绘凸曲线轨迹。图 4.124(a)为单自由度实现上述运动曲线的机构。向连杆十字销轴输入圆周运动(驱动),腿部描绘出近似椭圆的轨迹,在有足机器人研究的初始阶段,它一度被使用。其缺点是甚至在支撑相也无法产生直线轨迹,因此使机器人本体容易上下晃动,步行动作不够稳定。图 4.124(b)中的切比雪夫连杆机构可以克服这个缺点。同样,向连杆输入等速圆周运动,能描绘出直线、曲线两种轨迹,生成占空系数大于等于 0.6 的腿部轨迹。缺点是连杆的终端必须位于车体的下方,有降低横向刚性的趋势。上述两种机构均没有自由改变腿部轨迹的自由度。

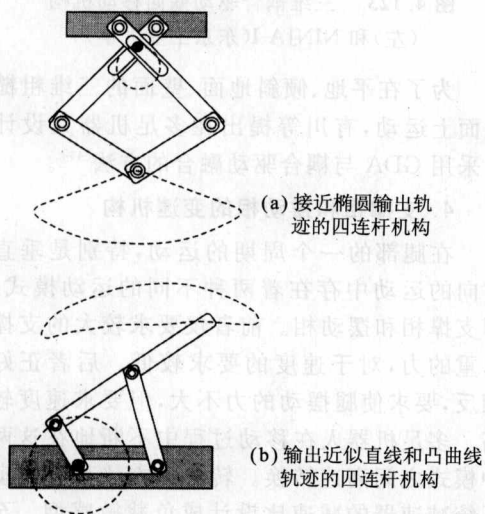


图 4.124 采用圆轨迹输入的单自由度腿部结构

实际的腿部机构设计中每条腿均设置 2 个或 2 个以上的自由度,以便在平面或立体空间内描述多种腿部轨迹。最简单的机构当然是各个关节独立驱动的串联连杆机构(图 4.125(a))。前面的机械手曾经用到类似的机构,若将各个关节替换直动液压缸,则机构与挖土机很类似(图 4.125(b))。它们的优点是控制简单、工作空间大,但作为腿部机构有

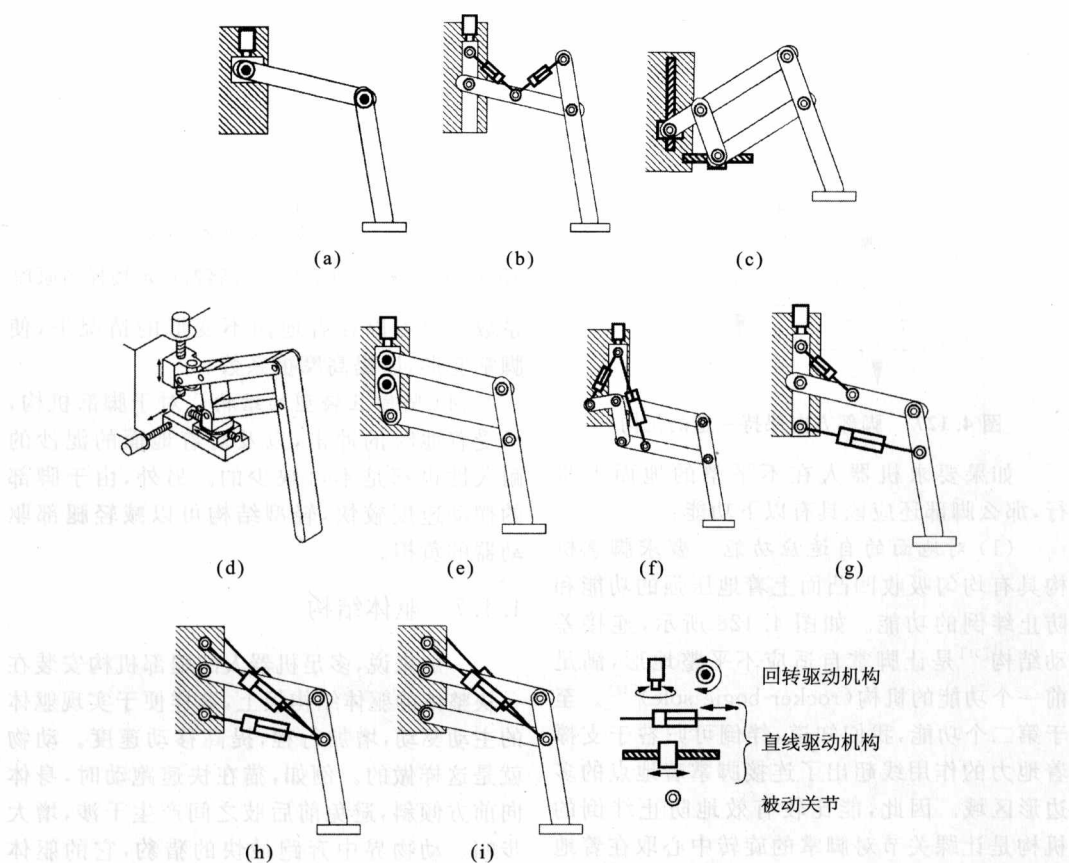
以下问题:① 有较大的负载施加于腿部(腰部关节)驱动器;② 腿部质量大,步行中机器人的重心位置容易变动;③ 由于不属于 GDA,即使在平地步行,能量消耗也大等。解决问题①、②的措施是尽量将驱动器靠近本体安装,然后利用缩放机构放大位移量。

经常采用的缩放机构的例子如图 4.125(c)所示。它的输出与输入位于同一个方向,位移量按连杆长度放大,因此便于将驱动器安装在靠近机体的地方。它的另一个特性是沿直角坐标系位移,能按照垂直方向和水平方向分别驱动,因此它属于 GDA。图 4.125(d)的 3D 缩放机构通过滚珠丝杠驱动。

用具有这样放大功能的缩放机构做成的腿部,不仅适用于直角坐标系,还能根据作业目的或移动环境加以变形。例如,图 4.125(e)将缩放机构的 2 根连杆作为输入,分别组成不同的独立旋转驱动。同样的动作还可以改换成滚珠丝杠驱动机构,以提高刚性(图 4.125(f)),它适用于六足机器人。完全同样的功能还可以用全部滚珠丝杠驱动的机构来实现。另外,也开发了将缩放机构的一根连杆换成直线驱动的机构,它适合在倾斜面上步行(图 4.125(g))。为了利用这些机构来实现 3D 动作,机构需要围绕垂直轴旋转,不过如果将它用于克服重力的步行,该轴的驱动器会出现负载集中的现象。

若将图 4.125(g)中的一部分改变成如图 4.125(h)所示,构成 3 个直线驱动系统,腿部的工作空间虽然小了,但能够实现基于耦合驱动的 3D 动作,因此驱动器的负荷率增大,输出的功率也大。这样的机构适用于四足机器人,实现爬壁步行。图 4.125(i)将一个驱动器换成定长度连杆,虽然属于 2 个自由度驱动系统,但是仍能实现 3D 动作。这样的设计有利于结构的轻型化,因此适用于由汽缸驱动的跳跃机器人。

有人提出一种节省空间的机构,能实现与缩放机构完全同样的功能。如图 4.126 所示,它由三层缸体构成。外层安装动滑轮,通过动滑轮的钢丝绳被位于内层和中层上端的连杆张紧。在这样的结构中,若 A 点运动,则前端点 B 的位移被放大 2 倍,实现圆柱坐标系运动。使用该机构的四足机器人中, A 点采用 λ 形 Evans 机构驱动,结果既能有效利用

图 4.125 2 个或 3 个自由度的腿部机构分类^[5]

GDA 原理,又能扩展工作空间。

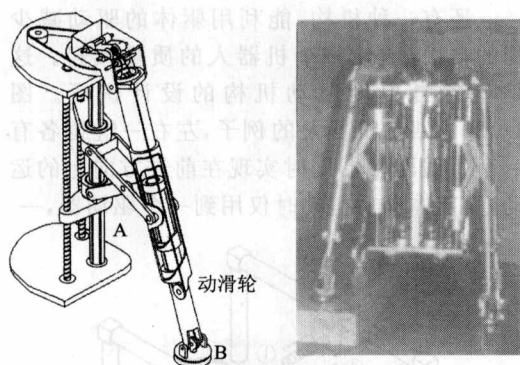


图 4.126 (左)钢丝绳驱动的位移放大机构与 Evans 机构的腿部(右)TITAN-VI(东京工业大学)

4.4.6 脚部机构

与机械手的手部机构相比,迄今为止关于多足机器人脚部机构的研究事例还相当少。需要指出的是,在实际开发脚部的时候

应该针对机构和传感器两个方面同时开展周密的研究。

进行脚部设计时至少必须注意的是,在支撑相阶段,即使腿部关节角度发生变化,也要始终维持脚掌稳定的着地状态。实际上,简单地将脚部设计成球面,在某种程度上就能应对这一点,不过这样容易引起滑动的问题,而且载荷还过于集中。因此,平板脚部仍然是最多的选择,然后经过球铰、万向接头加轴承等方式与踝关节连接,再用弹簧元件支撑。

人们正在尝试主动驱动脚部。若为脚部安装另外的驱动器,将增加质量,因此有效的方式是借用腿部机构驱动器。主动驱动脚部是一种与腿部姿态无关,使脚部平板保持与躯体平行的机构。它的基本原理如图 4.127 所示,3 个不做整周转动的齿轮组,即在齿数相等的两个齿轮之间放入另一个齿轮后,驱使连接 3 个齿轮的连杆旋转,结果顶端的齿

轮始终向同一方向转动。完全同样的功能也可以借用滑轮、钢丝绳结构来实现,在东京工业大学的 TITAN-VIII 中已经有应用。

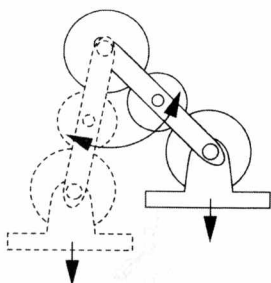


图 4.127 脚部方向保持一定的机构

如果要求机器人在不平整的地面上步行,那么脚部还应该具有以下功能:

(1) 对地面的自适应功能 要求脚掌机构具有均匀吸收凹凸面上着地压强的功能和防止绊倒的功能。如图 4.128 所示,连接差动结构^[31]是让脚掌自适应不平整地形,满足前一个功能的机构(rocker-bogie sole)^[32]。至于第二个功能,我们知道,绊倒可归咎于支撑着地力的作用线超出了连接脚掌着地点的多边形区域。因此,能比较有效地防止绊倒的机构是让踝关节对脚掌的旋转中心取在着地面之下,例如,提出了 RC(Remote Center)机构^[52]等。

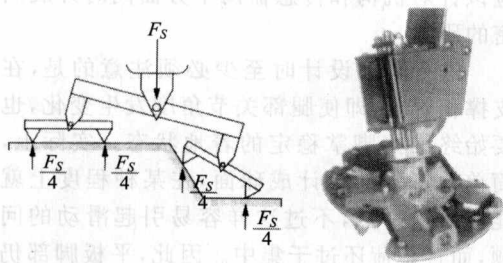


图 4.128 采用连接差动机构的脚部机构(左)及 Rocker-Bogie Sole(右)(东京工业大学)

(2) 感知功能 需要安装着地判别、检测支撑相着地力、摆动相中与障碍物接触等的传感器(图 4.129)。例如,有一个例子用形状记忆合金支撑弹性触须作为传感器,来实现阶梯爬行。

(3) 防止滑落功能 防止在倾斜面上移动时发生滑落的手段,比较有效的是在脚掌上安装爪子,使着地面产生变形,以提高摩擦

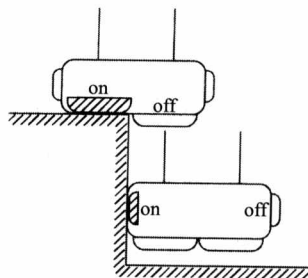


图 4.129 根据脚尖感知传感器行走楼梯的原理

系数。也可以在着地面不变形的情况下,使脚掌变形,以提高摩擦系数。

(4) 坚固且轻型的结构 对于脚部机构,承受着地时的冲击,以及对着地面的泥沙的耐久性也都是不可缺少的。另外,由于脚部的摆动速度较快,轻型结构可以减轻腿部驱动器的负担。

4.4.7 躯体结构

一般来说,多足机器人的腿部机构安装在一块整体的躯体结构板上,这样便于实现躯体的主动驱动,增加行程,提高移动速度。动物就是这样做的。例如,猫在快速跑动时,身体向前方倾斜,避免前后肢之间产生干涉,增大步幅。动物界中奔跑最快的猎豹,它的躯体比马匹更柔软,靠背部的屈伸能增大前后肢之间的步幅^[1]。因此,有些研究人员仿照生物力学,在机器人的躯体中引入脊椎结构。

还有一种机构,能利用躯体的驱动减少腿的自由度,使整个机器人的质量减轻。这是节省自由度驱动机构的设计例子。图 4.130 为四足机器人的例子,左右一组腿各有一个直线驱动器同时实现在前进方向上的运动,而躯体前后扭动时仅用到一个驱动器,一

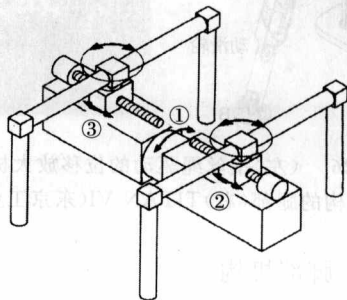


图 4.130 引入躯体扭动实现节省自由度机构的四足机器人^[5]

共3个驱动器便可以实现静态步行。

在六足机器人中也报道了类似的机构,将在后面的4.4.11小节中叙述它。

4.4.8 多足机器人机构和控制稳定性

1. 稳定性评价标准的分类

下面研究多足机器人步行的稳定性评价标准。丧失稳定性的原因有“翻倒”与“滑落”两种。其中,滑落取决于支撑腿与着地面之间的摩擦系数和倾斜度。研究积极防止滑落的措施很重要,不过我们在这里假设靠脚底的钉状物等已经避免了滑落的发生,仅研究翻倒的问题。

关于多足机器人翻倒的稳定性评价标准,目前有几个方案。将它们进行分类,大致有以下6种:

1) 稳定余量^[6]

假设多足机器人在水平着地面上以静态步行前进,若它的重心向着地面的下垂线的垂足(重心投影点)位于着地面上连接各条支撑腿所形成的支撑多边形内部,则不会发生翻倒。可见,重心投影点到支撑腿多边形的边的距离可以作为稳定余量(stability margin)的评价量。

2) 翻倒稳定余量^[7,15]

考虑多足机器人围绕连接任意两个支撑腿着地点的轴(支撑腿线)的翻倒情况,翻倒稳定余量(tumble stability margin)指围绕该轴的防止翻倒方向的力矩绝对值除以多足机器人质量所得到的长度量纲。它是在不能使用ZMP概念那样的,垂直反力的方向因各条腿着地点的不同而异的环境中也能够使用的评价量。

3) 倾斜度稳定余量^[8]

多足机器人站立的整个环境向任意方向倾斜时,以多足机器人开始翻倒的倾斜角作为评价倾斜度稳定余量(gradient stability margin)的标准。

4) Tip over stability margin^[9]

这个标准虽然在概念上与倾斜度稳定余量相等,但它不仅考虑重力,而且考虑了所有的外力都作为翻倒的原因,用开始翻倒的极限角来评价稳定性。

5) NE 稳定余量^[10]

多足机器人的支撑腿保持关节运动停止

状态下,围绕支撑腿连线翻倒时,可以用翻倒过程中重心被举起的最高点与初始高度之差作为稳定余量的标准。它与Klein等提出的能量稳定余量^[11](energy stability margin)(将翻倒需要的能量作为评价标准)属于同一概念,只是后者用质量做了归一化。当设定水平面的重心高度为0时,NE稳定余量(normalized energy stability margin)与McGhee等提出的稳定余量是一致的。

6) dynamic energy stability margin^[12]

这个标准虽然在概念上与energy stability margin相等,但它不仅仅包含重力,还取所有的外力来评价稳定性。

我们可以认为,上述1)、3)、5)属于静态稳定性评价标准,如果考虑动态效果,那么评价标准就相当于2)、4)、6)。所谓多足机器人的稳定性,也可以用与姿态有关的全部围绕偏转角的评价值中的最小值来定义。

2. 稳定性评价标准的比较研究

若针对在倾斜面上以静态步行行进的多足机器人采用上述1)、3)、5)条评价标准,那么所推导的最佳姿态各自不同(图4.131(d))。为了简单起见,这里假设二维平面,并且重心沿平行于连接支撑腿的连线移动。做这些假设的合理性理由如下。

① 按照“稳定余量”的概念,希望重心投影点位于几何学的中心,因此可以推导出图4.131(a)的结果。该姿态使重力产生的围绕各支撑腿的稳定力矩均匀地最大化,但是来自水平方向的干扰产生的力矩向倾斜面下侧方向增大,加剧翻倒倾向。这是由于“稳定余量”未考虑重心高度对稳定性影响而产生的矛盾。但是,在多足机器人保持重心高度不变且沿水平面上移动时,它可以是最简便的评价标准。

② 按照“倾斜度稳定余量”的概念推导出的最佳姿态如图4.131(b)所示。由于重力与干扰力的合力作用线上下都贯通支撑腿,能够产生来自重力的稳定力矩,并且该力矩与来自于干扰力的力矩成正比。因而,我们也可以认为这个概念可以用来评价支撑腿克服外力提升的容易程度。

③ 按照“NE稳定余量”的概念得到的最佳姿态如图4.131(c)所示。如果加速度等

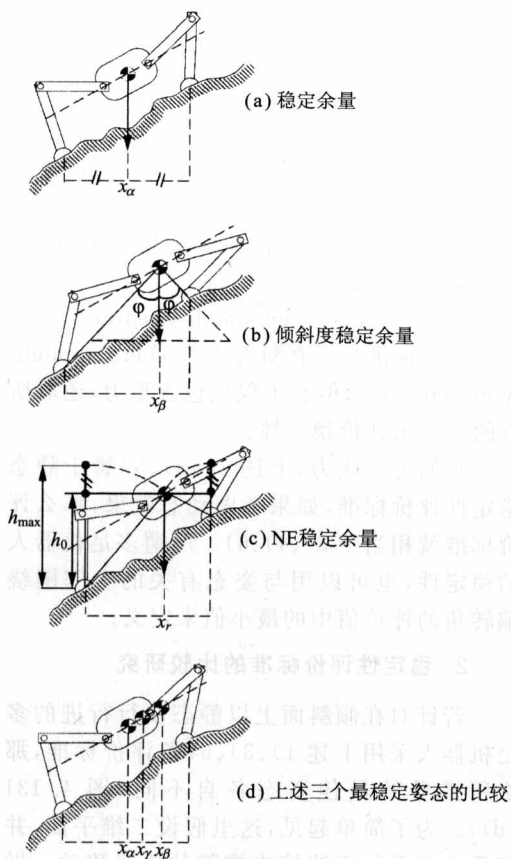


图 4.131 多足机器人的最稳定重心位置

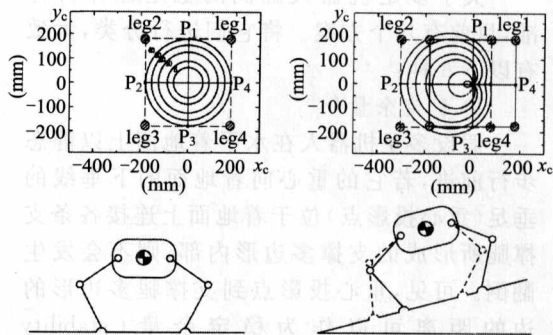
产生的干扰力是脉冲式的,那么即使多足机器人瞬时围绕支撑腿抬起,也会立刻恢复原态,而避免翻倒。即如果能量无法克服重力的位垒(potential barrier),腿的抬起就不应视为翻倒的预兆。如对于图 4.131 中的(b)和(c)的姿态慢慢增加干扰力的实验确认,支撑腿首先离开着地面的姿态有如图 4.131(c)所示,但进一步增加干扰力,反而回归到先前不翻倒的姿态,即如图 4.131(b)所示^[10]。不过,实际的多足机器人都存在机械柔顺性,与上述几何学评价相比,稳定性将会有所减小。

除了上述的稳定性评价标准外,还有其他观点。可以预计,今后仍然会有一些考虑干扰因素的评价标准出炉。

3. 稳定余量的等高线

三维空间中,多足机器人一般不围绕单个支撑腿翻倒,而是围绕连接两腿的支撑腿着地点的支撑腿连线翻倒。为了简化稳定性

研究,需要想一些办法。例如,用重心向支撑腿线的下垂线垂足(P)代替着地点开展研究,就可以把评价稳定性的问题简化成二维来处理。接着,在多足机器人腿部工作空间与着地面相交的平面内,描绘等高线(连接稳定性评价量相等的垂足P的曲线),这一方法对于研究高稳定性步态是有很有效的。例如,NE 稳定性余量的等高线(S_{NE} 等高线)^[10,44]形成在水平面上以重力投影点为中心的同心圆,在倾斜面上形成斜面下侧凸起的曲线(图 4.132)。无论是什么斜度,只要支撑腿多边形内能够包含更大形状的等高线,这种步态就是稳定性较高的步态。

图 4.132 平地与倾斜面有不同形状的 S_{NE} 等高线

4.4.9 单足机器人

单足机器人的移动只能通过空中飞跳达到其他的着地点,也就是说它的运动形式只能采取跳跃。本小节针对连续跳跃实现高速移动的 hopping 加以说明。hopping 运动大致可以分为两个阶段:一个是脚部接触地面的支撑相阶段;一个是处于空中飞跳的跳跃相阶段。其中,支撑相可视为倒立摆的一种运动。在跳跃相阶段,整个系统处于不可控状态下,无法操作动量或角动量,因此重要的问题是下一个支撑相作准备,设定脚部在着地前将达到什么位置。

跳跃需要非常大的功率,需要考虑提高能量效率的措施,因此在硬件方面,弹簧零件不可缺少,它的作用是在着地时储存冲击能量,为下一次跳跃作准备。在自然界中的实际存在也证实了弹簧的有效性。通常,消耗能量是与移动速度成正比线性增加的^[50],一

个很有意思的报告指出,袋鼠用于 hopping 的单位体重的功率却随速度的上升而减小^[1]。这可以认为是它巧妙地着地时的冲击能量存储在肌腱弹性体中转化为弹性能量的结果。

人们在控制方面针对 hopping 进行了许多很有意思的研究,最有代表性的例子可以举出 20 世纪 80 年代 Raibert 等的研究成果^[4]。

图 4.133 所示为 2D 平面内移动的单足机器人,由相当于弹簧零件的一个汽缸和机体构成。该汽缸在另一个小汽缸驱动下还能相对于机体做单自由度的旋转运动。另外,机器人还装有测量腿的长度和旋转角度的传感器、脚部的接触传感器、汽缸压力传感器。机体的横向有刚性构件和球面轴承支撑,再触及地面,整个机器人被约束在半球面上运动。这样的结构,能将 hopping 所需要的控制参数分解为①跳跃高度的控制;②水平方向的移动速度;③姿态稳定控制等 3 个参数。其方法如下所示:

(1) 跳跃高度 跳跃高度不仅取决于踢出力 and 着地面的冲击系数,而且取决于前一个周期跳跃的动能和跳跃过程能量的损耗,因此无法用简单的数学公式来表达。实验确认,若在支撑相向踢出缸供压的时间和在跳跃相让踢出缸减压的压力幅度这两个参数保持在某个值上,那么经过四次左右的跳跃后,跳跃高度就将收敛为一个定值。

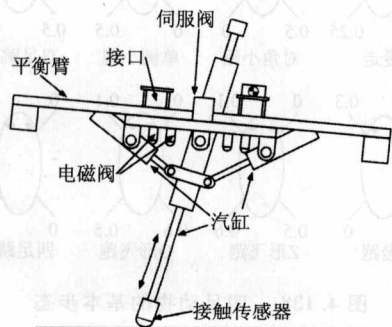


图 4.133 Raibert 等开发的单足跳跃机器人的结构

(2) 水平方向的移动速度 利用小汽缸调整跳跃相即将着地前的脚部位置,能控制离地瞬间的速度。由于脚部位置的调整相当于改变着地前后弹簧的倾角,因此也就能改

变着地前后位能与动能的分配比例。选择保持该比例不变的着地点,则着地前后的移动速度的水平分量将相等,该点被称为中点(neutral point),可借助于下式导出:

$$x_0 = \frac{\dot{x} \cdot T_s}{2}$$

式中, x_0 为着地前瞬间从重心正下方位置到中点的距离; \dot{x} 为着地前瞬间水平方向的移动速度; T_s 为支撑相时间(由质量、汽缸弹簧常数组成的简谐振动周期决定)。

从该点向稍前方向着地,由于着地后瞬间位能减少,故动能增加,即为加速模式(图 4.134)。反之,若从该点向稍远方向着地,则减速。根据以上的现象,实现目标速度用的脚部的位置可以用下式表示:

$$x_f = \frac{\dot{x} \cdot T_s}{2} + k_x (\dot{x} - \dot{x}_d)$$

式中, x_f 为着地前瞬间脚部位置; \dot{x}_d 为离地后瞬间水平方向的目标速度; k_x 为反馈增益。

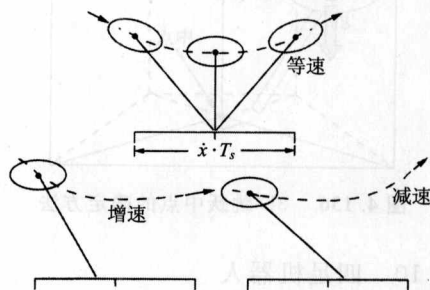


图 4.134 离地后的瞬间速度与中点、着地点的关系

(3) 姿态稳定 从跳跃相到着地直线,腿部的旋转驱动可以控制水平方向的移动速度。另外,如果环境允许在脚部与地面之间生成足够的摩擦力,那么支撑相的旋转驱动就能够起到控制机体姿态的作用。实现目标姿态 ϕ_d 用的旋转转矩用下式求出:

$$\tau = -k_p (\phi - \phi_d) - k_v (\dot{\phi})$$

式中, τ 为绕机体的腿部转矩; k_p 及 k_v 分别为位置、速度的反馈增益; ϕ 为绕机体的腿部转角。

上述 2D 的跳跃控制理论也可以进一步扩展到 3D。3D 机器人机体的结构是在单腿汽缸的周围从不同方向用万向接头支撑,靠两个液压缸控制姿态(图 4.135)。与 2D 的情况不同,通过重心的速度向量、重力向量及脚

部彼此不一定在同一个平面内,因此在以中点为原点的两个正交的平面上分离并导出(图 4.136)。

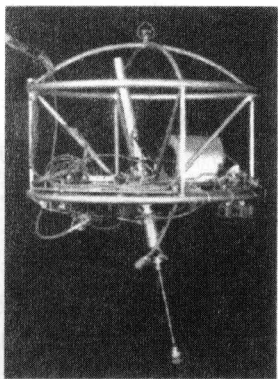


图 4.135 Raibert 等开发的 3D 跳跃机器人(CMU)

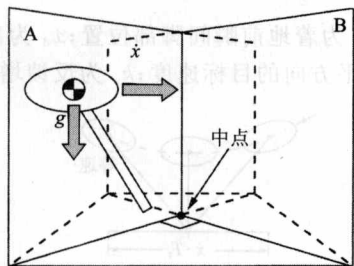


图 4.136 3D 跳跃中点的确定方法

4.4.10 四足机器人

四足机器人具有实现静态步行的最少腿数,它也适用于动态步行,以实现高速移动。正是鉴于这些诱人的优点,围绕它展开了大量的研究。特别是有关步态,至今已发表了许多报告。本小节将介绍基本步态。

我们研究的四足机器人的各条腿有 3 个自由度,设脚部能够在如图 4.137 所示的腿部工作空间内自由运动。

1. 四足动物的步态和移动速度

已知自然界中,四足动物的步态可以归纳为如图 4.138 所示的几种^[2]。图 4.138 中的数字表示腿相位,设基准腿(左前足)着地时刻为 0,一个周期后同一条腿的着地时刻为 1,其他各条腿的着地地时刻用 0 到 1 表示。慢走步态与爬行步态(后面要提到)相同,乃是一般哺乳类动物低速步行时经常可以观察到的静态步行。对角小跑、单侧小跑、双足跳跃步

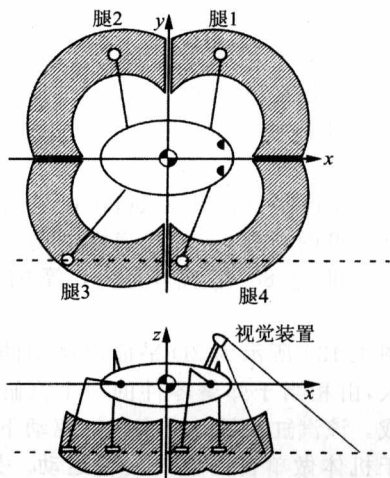


图 4.137 四足机器人腿部假想工作空间

态^[13]则属于两条腿同时摆动的动态步行,人们已经掌握,它们的速度按上述顺序越来越快^[16]。其中,对角小跑步态是对角两条腿摆动的步态,将腿沿横向张开移动的动物的这种步态容易保持动态稳定性。比如,以匍匐姿态保持体温的蜥蜴等冷血动物经常可以观察到这样的步态^[1]。单侧小跑步态是单侧前、后两条腿摆动的步态,它反而在脊背较高而腿不沿横向张开的骆驼等动物中常见^[5]。此外,已知还有具有跳跃特性的跳跃步态和其他三种跑跳步态。

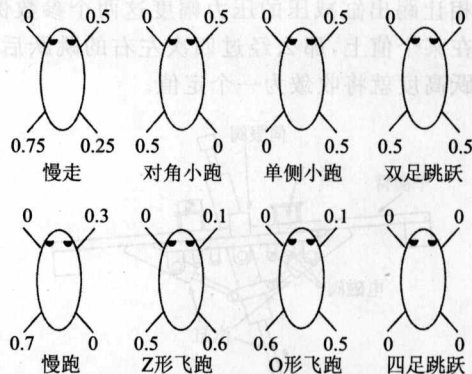


图 4.138 四足动物的基本步态

2. 匍匐步态^[13]

如果多足步行的单位步行周期中最多仅一条腿作为摆动相,这样的步态统称为匍匐步态(creeping gait)。四足情况下的匍匐步态分为 $(4-1)! = 16$ 组。进一步根据各个移动方向上稳定性的大小进行合理分类,如图

4.139所示,大致有三类:沿 x 方向的前进后退(X形步态),沿 y 方向的前进后退(Y形步态),以及原地旋转的左转右转的循环步态(O形步态)。按摆动腿的顺序将四足机器人的静态步行进行分类,肯定跑不出这三种分类之一。

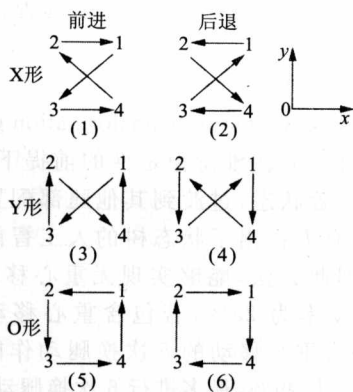


图 4.139 匍匐步态的分类

3. 爬行步态^[20]

与前面的慢走步态相同,将单侧腿从后面向前摆动的静态步行统称为爬行步态(crawl gait)。我们将重心移动速度保持一定的称为规则步态(所有腿的占空系数相等的步态),其中爬行是使纵向稳定余量最大的步态。按照占空系数 β 来分,在 $1 > \beta \geq 0.75$ 时为静态步行,在 $0.75 > \beta > 0.5$ 时为动态步行,如果 $\beta = 0.5$,就可以顺利地转移为对角小跑步态。图 4.140 给出步态的具体变化。在爬行步态中,一个接一个地顺序切换支撑腿三角形,一面使重心进入各支撑腿三角形中,一面持续步行。但是,在后腿摆动的瞬间,支撑腿三角形的切换不出现重叠,此瞬间的稳定余量最小。将它称为“对角三角形切换点(DTE点:Diagonal Triangle Exchange Point)”,它在腿部轨迹设计时具有重要意义,要加以注意^[21]。出现 DTE 点的一组腿部位置可以推导出来,即对于前腿,从行程后端起算的距离,以及对于后腿,从行程的前端起算的距离均为 $\lambda/4\beta^{[21]}$ 。利用该性质,则按照 6 个过程可以推导出爬行步态的一般基准腿部轨迹。如果处于 DTE 点,由于 $\beta = 0.75$ 时稳定余量为 0(图 4.140(左)),因此在多数情况下以 $\beta \geq 0.8$ 进行步行。

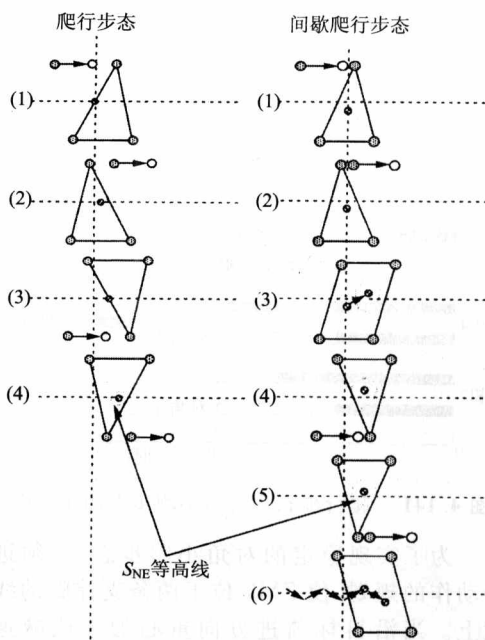


图 4.140 爬行步态与间歇爬行步态的区别

4. 间歇爬行步态^[22]

为了在不平整地面和倾斜地面上实现稳定步行,塚越等提出不考虑重心的等速性,而追求稳定性最大化的静态步行。在间歇爬行步态(intermittent crawl gait)中,单腿摆动的条件是在支撑腿三角形中的工作空间内将重心保持在稳定性最高的位置。在着地后呈现 4 条腿支撑状态时,使重心移动到下一次摆腿所对应的稳定性最高的位置。重复这些动作,重心轨迹虽然因腿部工作空间和移动方向而异,但总能生成间歇直线或锯齿形轨迹(图 4.140(右))。该轨迹通过支撑腿三角形内描绘出包含足够 NE 稳定余量的 S_{NE} 等高线的腿部轨迹^[22]。若从躯体坐标系观察,腿部轨迹呈 V 字形,而摆动腿顺序与爬行步态完全相同。

5. 对角小跑步态和扩展对角小跑步态

可以认为,与其他动态步行相比,对角小跑步态是更具有实用性的动态步行,理由是:① 即使围绕对角的两条支撑腿发生翻倒,借助于另外两条摆动腿也完全能够防止翻倒;② 与爬行步态的适配性好,因此仅改变占空系数(从占空系数为 0.75 的爬行步态到占空系数为 0.5 的对角小跑步态)就能连续生成

与目标速度相适应的步态(图 4.141)。将占空系数从 0.5 扩展到 1 的步态称为扩展对角小跑步态^[23]。

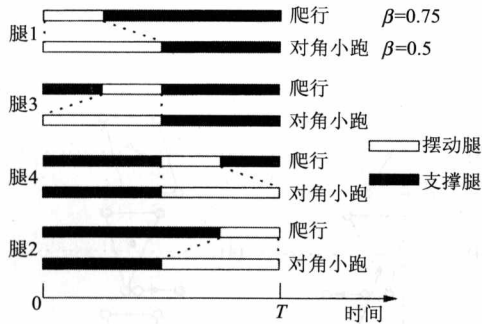


图 4.141 爬行步态和对角小跑步态的步态图

为了实现稳定的对角小跑步态,必须进行动作的规划,使 ZMP 位于两条支撑腿的线段上。当沿目标前进方向重心加速或减速时,如果给出的加速度变化有如图 4.142(a)所示的那样极端不连续,就无法实现平滑的动作。反之,如果给出重心按图 4.142(b)所示相对目标轨迹左右摇动,则加减速变化平稳。根据这样的思想,有人进一步提出了合理摇幅的计算方法^[23]。

6. 全方位移动的各种步态

1) 斜行步态^[24]

斜行步态(crab gait)指形成倾斜角 α 的步态。在四足的情况下,经常采用沿 α 方向前进的爬行步态。匍匐步态中,X 形步态相当于 $\alpha=0$ 或 π 的斜行步态,Y 形步态相当于 $\alpha=\pm\pi/2$ 的斜行步态。

2) 旋转步态^[25]

广濑等研究了给出在任意旋转中心的条件下,从匍匐步态的 X、Y、O 形中挑选何种步

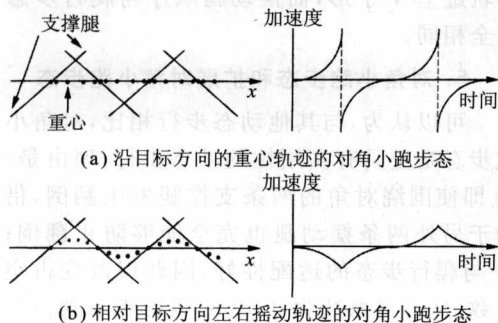


图 4.142

态最佳的动作规划问题。他们的研究报告指出,若考虑“机体重心旋转速度最大条件”和“单位周期重心移动量最大条件”两个评价函数,则借助于非线性规划法,能够得出最佳旋转步态(circular gait)的解。至于四足机器人的 X 形步态和 Y 形步态,它们分别相当于旋转中心位于 y 轴和 x 轴的无限远处的旋转步态。

3) 换腿步态^[26]

换腿步态(posture transformation gait)是指四足机器人在维持稳定性的前提下,从腿部某一配置状态,过渡到其他腿部配置状态的步态,有人提出了状态树的人工智能解决方法。据此方法,能够实现无重心移动的 4 次换腿概率为 25%,若包含重心移动则为 95%,包含重心移动的 5 次换腿动作能够实现的概率为 99%,最多进行 6 次换腿动作,从任何腿部配置过渡到其他任何腿部配置的概率为 100%。

4) 基准收敛型自适应步态^[24]

基准收敛型自适应步态是四足机器人在凹凸地面上行走的基本步态。它根据状态来选择基准步态或自适应步态。如果面对粗糙的地面,那么仅靠基准步态无法持续步行。若仅考虑对地面适应性强的自适应步态,则当机器人从粗糙地面回到平地时步态就会发生不稳定的问题,以至于无法保证收敛到最高安全性和移动效率的基准步态。因此,人们提出了既对地面自适应步行,又力图向基准步态收敛的步态(地形许可的范围内)。在从任意基准步态改变移动方向过渡到基准步态时,也可以采用上述方案。

5) 间歇对角小跑步态^[27]

如果打算连续移动重心,同时摆动两腿,那么在动作规划时就必须考虑重心的动态效果。与此不同的是,尽管间歇对角小跑步态(intermittent trot gait)未考虑动态效果,仍然能在两腿摆动的同时实现步态的移动。对角小跑步态只要求 4 条腿支撑状态时移动重心,在两条腿支撑状态下停止在连接支撑两条腿的线段上,在翻倒前摆动腿能够着地即可。它的优点是用于旋转动作或换腿动作的算法比较简单。实现对角小跑的条件是抬高重心,延长翻倒时间,加大支撑腿的脚掌面

积,减少踝关节机构的自由度。

4.4.11 六足机器人

六足机器人的腿数多,容易维持步行较高的稳定性,因此在交通工具或特殊环境作业的大型机械中不乏开发的事例。研究证明,六足具有很强的实用性,因为在机体尺寸一定的限制下,从四足增加到六足,稳定性将显著增加。又有研究说,腿数增加到六足之后,即使继续增加,稳定性也不会有大的改善了。六足机器人另一个吸引人的地方是实现静态步行的算法很简单。

1. 六足步态

六足的基本静态步行可以大致分为两种,即 3 腿支撑步态和波形步态。前者在移动中其重心落入 3 腿的支撑腿多边形内,故相邻的腿不会同时充当摆动腿,如图 4.143 所示,1、3、5 或 2、4、6,彼此相隔的 3 条腿同时摆动。在六足静态步行中这样的相位是移动速度最快的步态,因此昆虫都具有这样的步态。

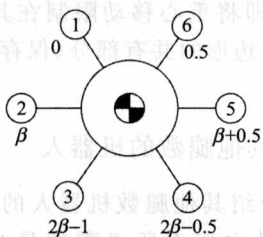


图 4.143 波形步态的占空系数分配

要继续增加稳定性,最好采取如图 4.143 所示的相位。该步态同一侧的腿部从后向前摆动,类似波动传输,因此被称为波形步态。此时占空系数选取 $0.5 \sim 1$ 的值,占空系数为 0.5 时相当于 3 腿支撑步态。随着该值的增大,虽然稳定性增加了,但移动速度减慢了。因此,米田等提出根据要求的稳定性和移动速度在步行中改变占空系数的所谓可变波形步态^[28]。图 4.144 的横轴取相当于一个周期时间变化的运动学相位,纵轴取占空系数,图 4.144 中编号代表支撑腿,越是处于图的上方,支撑腿数越多;越是处于图的下方,支撑腿数越少。占空系数一定的步态相当于图 4.144 中向水平右方前进。沿图 4.144 中连续斜向上的轨迹,能够连续改变占空系数。

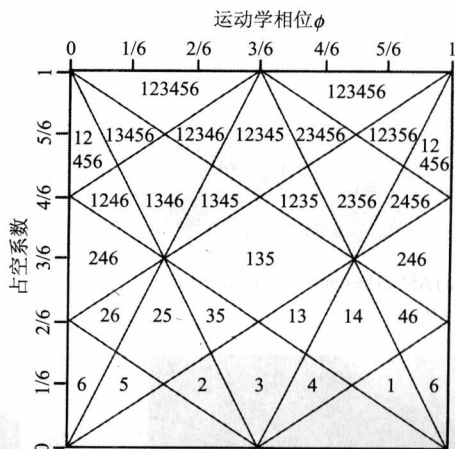


图 4.144 随着占空系数变化的支撑腿

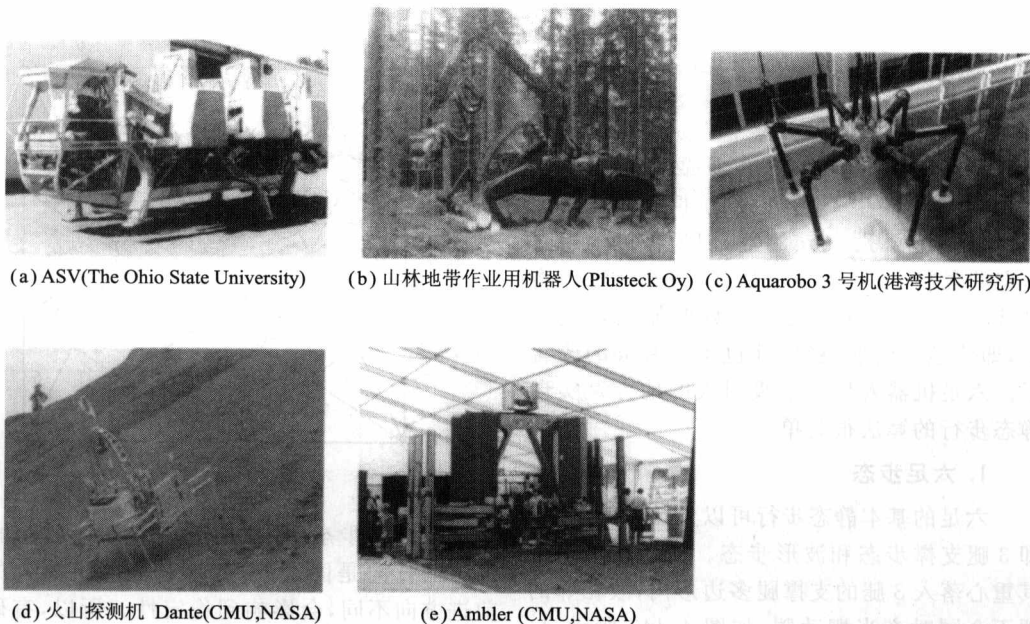
在波形步态中,摆动腿动作顺序(波动)的传输方向是固定的,如果它们与机器人的前进方向不同,会影响到稳定性。所以,有研究还提出了能够任意设定波动传输方向的扩展波形步态方案。

2. 典型开发事例

按照腿部对躯体的配置形态,已开发的六足机器人大致可以分为4种:①昆虫型;②辐射型;③躯体分离型;④其他。下面分别加以介绍。

(1) 开发了若干对躯体左右对称安装腿部的六足机器人,它们的头部被设计成驾驶室。其中如美国 OSU(俄亥俄州立大学)研制的 ASV(Adaptive Suspension Vehicle)(图 4.145(a)),它的体态很大,用汽油发动机驱动,利用力控制在泥泞地中稳定着地。每条腿有 3 个自由度,使二维缩放机构围绕横摇轴旋转,共计 18 个液压缸均靠独立液压泵驱动。又如芬兰的 Plustech 公司试制的山林地带作业六足步行机器人(图 4.145(b)),它在山林中步行,到达目的地后,开动位于悬臂末端的机械进行森林采伐作业。它还尝试一种新的移动方式,让后腿与前腿利用同一地点着地步行,以便使地面的损伤程度最低。它靠全液压驱动,水平移动的速度为 $2 \sim 3 \text{ km/h}$ 。

(2) 至于相对躯体以点对称配置腿部的六足机器人,可以举出日本运输省港湾技术研究所开发的海底探测 Aguarobo3 号(图 4.145(c))。它沿海底凹凸地面行走时能保持躯体



(a) ASV(The Ohio State University)

(b) 山林地带作业用机器人(Plusteck Oy)

(c) Aquarobo 3 号机(港湾技术研究所)

(d) 火山探测机 Dante(CMU,NASA)

(e) Ambler (CMU,NASA)

图 4.145 特种大型六足机器人举例

的水平,利用这样的形体配置便于实现全方位移动控制。

(3) 若只实现 3 腿支撑步态步行,没有必要对各条腿分别实施独立驱动,而要采取有效的省自由度机构。具体来说,就是将躯体一分为二,使一部分躯体相对于另一部分躯体做相对水平移动,同一个躯体上的 3 条腿完成上下动作实现步行。美国 CMU 的火山探测机器人 Dante(图 4.145(d))即为其中之一,它的两个躯体被设计成彼此前后滑动的机构。从山顶垂下的钢丝绳作为安全带,利用装在躯体上的绞盘一面牵引,一面沿火山的陡急斜面向下探寻,采集信息。除此以外,还可以举出一些例子,如三菱重工开发的 Landmaster,它的两个躯体能够实现平面内 3 个自由度的相对运动,以及东京工业大学的 Para-Walker,它的躯体甚至可以实现 6 个自由度的相对运动。

(4) 与四足相比,一般来说六足机器人在行程长度方面不具备优势,但是美国 CMU 的 Ambler(图 4.145(e))的躯体设计弥补了上述缺点。它分别有 3 条腿与左右两个轴连接,围绕该轴各条腿有旋转、轴向伸缩两个自由度。移动时,位于后面的支撑腿不与其他腿发生耦合,而它的着地点却在前进方向的最前方。有报道称,这样的移动方式能加快躯

体移动的速度。他们的研究中还引入了保存多边形的概念,即在任一条腿失去地面支撑反力后,立即将重心移动限制在其他腿构成的支撑腿多边形的共有部分(保存多边形)内的概念。

4.4.12 其他腿数的机器人

以下介绍其他腿数机器人的开发事例。既然稳定站立姿态所必需的最少腿数是 3 条,因此不少研究都是向 3 条腿步行机器人进行挑战。日本东京工业大学提出一种极特殊的 3 足步态,其中一条腿踢腿,使重心围绕剩下的两条支撑腿的直线摇动,同时实现移动。日本工学院大学开发了正 5 边形的 5 足机器人,提出了一种反复使一条腿或两条腿为摆动腿的静态步行方案。

在小型或微型机器人领域,随着腿数的增加,重量负担呈减少的趋势,因此允许设计腿数更多的多足机器人。例如,本间等采用螺旋弹簧状形状记忆合金制作的 8 足机器人,成蹊大学开发的 10 腿蜈蚣机器人等。

4.4.13 多足机器人适应不平整地面的手段

室外的不平整地形千姿百态,地面状况不同,多足机器人适应的技术也不同。本小

节按照凹凸起伏的程度,将复杂不平整地面形态大致分为如图 4.146 所示的 5 大类,阐明适应这些地形移动所必需的关键技术。将这些关键技术发展和融合,多足机器人移动的领域才可能被更加拓宽。

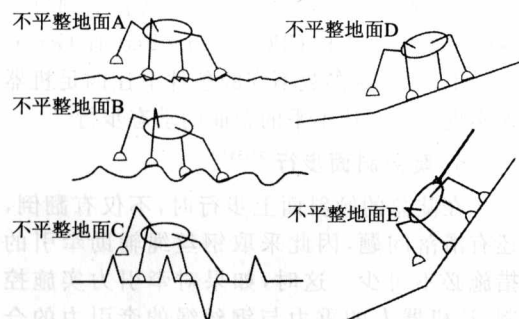


图 4.146 不平整地面按凹凸起伏的程度分类

1. 吸收凹凸面的脚部机构

如果凹凸面的起伏较小,脚部机构本身就能够对付了。例如,图 4.128 的连接差动机构等就挺有效。

2. 由着地力控制应对凹凸面

如果借助于机构无法解决凹凸地面的适应问题,那么必须依靠控制,以便适当分配各条腿的着地力,不让脚部抬起来。特别在四足或多于四足的支撑状态下,由于处于超静定状态,关节转矩的分配和着地力并非由位移决定。迄今为止,人们引入了各种解决这类控制问题的概念。如有:①线性规划法,达到最大着地压力为最小;②用速度更快的伪逆矩阵计算,力图使各条腿着地的平方和最小;③在无限多解中选出最接近当前产生的力的解,生成连续光滑的力指令;④测量柔软路面上腿部的下沉量,以便生成支撑自重所必需的着地力;⑤控制内部力(腿部彼此之间撑开的力),使之收敛于 friction cone 内;⑥对各条腿进行柔顺控制等。这些方法主要适用于六足机器人的静态力分配,其中部分也适用于四足机器人。

与此同时,人们也提出了四足机器人在凹凸地面实现动态步行的移动手段,称之为空间挂钩悬浮控制(sky-hook suspension control)^[33],它将前馈控制(依据动力学预先计算着地力实施前馈)和反馈控制(设定空间阻抗依靠反馈对躯体姿态实行补偿)融合起来实

施。在这种控制概念下,躯体被简化成如图 4.147 所示的在绝对坐标系中假想弹簧和阻尼器支撑的模型,与腿部关节直接设定悬浮状态的模型相比,前者容易抑制躯体倾斜状态,有利于实现凹凸面上的动态步行。至于在 4 条腿支撑状态下前馈控制的着地力目标值,如图 4.148 所示,可以通过线性插补求出。

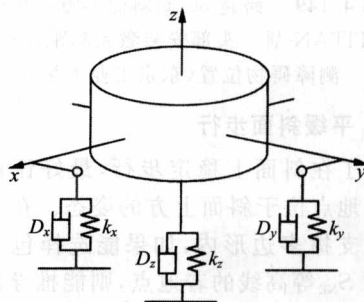


图 4.147 弹簧和阻尼器悬挂的多足机器人躯体模型

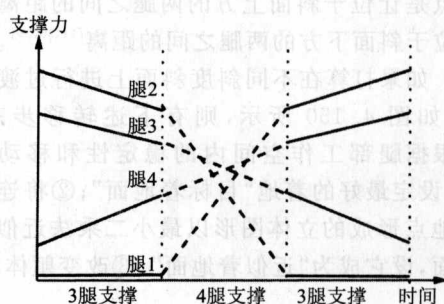


图 4.148 不平整地面上 4 腿支撑力的决定方法

3. 跨越障碍物

如果地面上有障碍物使机器人无法着地,那么机器人必须跨越障碍物行走。多足机器人能够任意选择着地点,实现在移动环境中的移动,这样的环境恰恰发挥了多足机器人原来的存在意义。已经报道了若干个有关的研究事例,例如,塚越等跨越障碍物的方法是利用激光测距仪检测障碍物,以四足机器人的间歇爬行步态为基础实现跨越(图 4.149)。此时的步态采取了下述策略:①设定持续步行所必需的极限 NE 稳定余量;②选择能维持该稳定余量以上的步行达到最远处的着地路径;③若无障碍物,则再次收敛于 NE 稳定余量最大的步态。

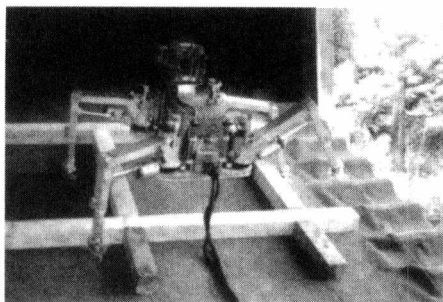


图 4.149 跨越 30° 倾斜面上障碍物的 TITAN-III。头部安装激光测距仪检测障碍物位置(东京工业大学)

4. 平缓斜面步行

为了在斜面上稳定步行,最好让重心相对于着地点位于斜面上方的姿态。在多足机器人的支撑多边形内,如果能选择包含尽可能大的 S_{NE} 等高线的着地点,则能推导出稳定步态。在四足机器人的情况下,若要从爬行步态和间歇爬行步态两种步态中进行选择的话,侧梯形步态应该更合理一些,这种步态的特点是让位于斜面上方的两腿之间的距离大于位于斜面下方的两腿之间的距离^[21,36,55]。

如果打算在不同斜度斜面上进行过渡转移,如图 4.150 所示,则有下列转移步态:①根据腿部工作空间内的稳定性和移动速度,设定最好的着地“目标着地面”;②将连接着地点形成的立体图形以最小二乘法近似为平面,设它成为“近似着地面”;③改变躯体的

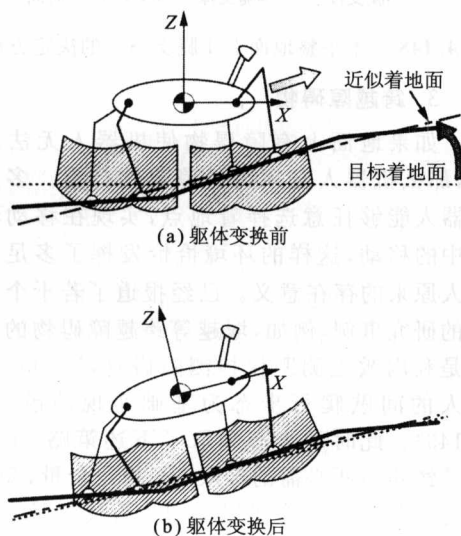


图 4.150 转移步态中的躯体姿态的变换

姿态,使“目标着地面”与“近似着地面”重合;④同时向 NE 稳定余量最大化的步态收敛。

另一方面的研究针对在未能完全掌握斜度信息的条件下,如何进行自主和自适应的动态步行。木村等以自然界动物的神经系统为参考,把基于传感器信息反射机制叠加到脊髓内的节奏发生机构 CPG (Central Pattern Generator) 上,在控制参数不变的条件下让四足机器人实现了沿起伏不平的斜面的动态步行^[19,51]。

5. 陡急斜面步行^[37,38]

在陡急的倾斜面上步行时,不仅有翻倒,还有滑落问题,因此采取钢丝绳辅助牵引的措施必不可少。这时,如果对牵引力实施控制,让机器人的重力与钢丝绳的牵引力的合力垂直于移动的斜面,那么机器人就能以完全相同于水平面的步态实现稳定步行。也有人在其他研究中提出如图 4.151 所示的解决办法,采用两根钢丝绳,其上装有力传感器(由弹簧和电位器构成),结果在 70° 的陡急斜面上实现了大范围步行。

4.4.14 控制系统

与腿部控制相关的运动学和动力学内容请参考第二章“手臂机构和控制”,本小节对整个控制系统进行简要的说明。多足机器人的控制系统如图 4.152 所示,可以大致分为三层(hierarchy),多数情况下这多个任务采用并行处理机制。

A 层是最上级指令系统,它的任务是预测生成到达某种程度远距离的多足机器人应该移动的方向、速度、移动姿态等命令。如果由人来操纵,该层起到了与控制者之间的接口作用。

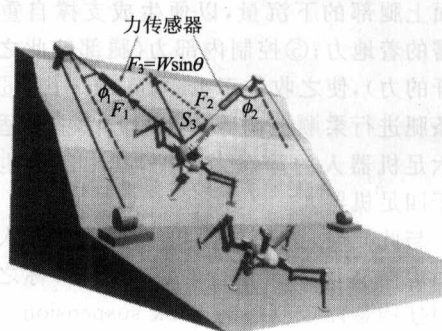


图 4.151 陡急斜面上多足机器人的钢丝绳牵引法

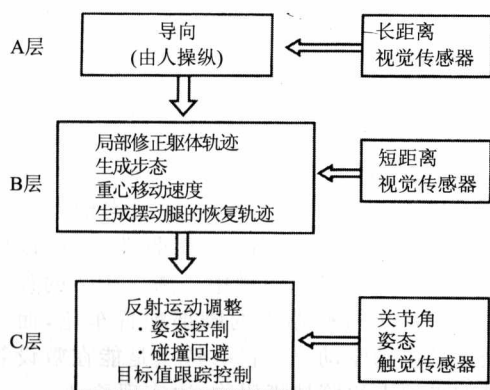


图 4.152 多足机器人的分层控制系统

B层是智能步态控制系统，一个波动（或一次摆动）执行一次。在该层级中，如果摆动腿动作结束时躯体重心的位置、速度、姿态和脚部位置给定，那么它就是一个规划下一个摆动腿动作中躯体和腿脚目标运动的系统。

C层的作用相当于生物体脑干的反射运动调整控制，在每个采样时间都在进行。该系统根据传感器的输入信息，判断每时每刻躯体和腿部的的位置、力、姿态等，计算各个时刻的目标值，同时进行反馈控制，力图使步行达到稳定。

4.4.15 多足机器人的研究动向和课题

多足机器人与其他移动形体最明显的区别在于它能够任意选择着地点来进行移动。为了充分发挥它的这个特点，除了传统的机构和控制技术外，还要再加上掌握移动环境信息，从而必须进行视觉传感器、图像识别、人工智能技术的融合。现在，基于视觉信息的步态生成研究十分盛行，使多足机器人终于能够借助于视觉迈动它的脚步。显然，人们今后在这个方面会抱有更高的期待。

塚越秀行

4.5 形形色色的移动机构

4.5.1 混合式移动机构

轮式移动机构能在平坦环境中高速且有效地移动，反之，它对于凹凸地面等不平整地面则呈现出了弱点。为了能既有效地发挥车轮的优点，又能在某种程度上适应不平整地

面，一种可行的途径是设法将车轮与其他形式的移动机构组合起来，有效地发挥两者的优点。

图 4.153 给出以车轮式为中心与其他移动机构混合的各种混合式机构。其中，可以考虑的其他典型移动机构有腿脚式、履带式、躯体式三种。腿脚式、履带式、躯体式虽然都对不平整地面有适应性，但又各具特点。例如，腿脚式的特点在于移动时与环境的接触是不连续的，而其他形式则是连续的。腿脚式能够选择离散的接触位置，因此具有较强的对不平整地面的适应能力。

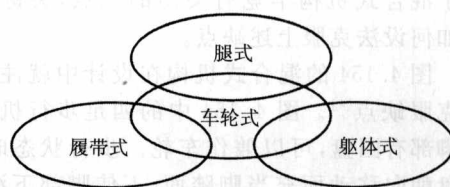


图 4.153 混合式移动机构的构成图

另外，因为其他方式是连续地与环境接触，所以不得不始终受地面凹凸起伏的影响，不过履带式把旋转运动用于移动躯体时，能获得可观的移动速度。如图 4.153 所示的组合中，腿脚与车轮、躯体与车轮的组合各自由于各自所具有的特点而迥异，倒能体现出突出的优点，至于履带与车轮的组合，也许正是由于特征不突出，至今研究开发的例子尚少^[1]。

1. 腿脚与车轮的混合

腿脚与车轮的混合呈现两种方式：一种可以看成在车轮式移动机构上追加腿脚的方式；另一种是腿脚移动机构，尤其是指脚部与车轮组合的方式。在这些方式中，按照腿脚和车轮运动控制的方式，又可以大致分为如表 4.9 所示的三类。

表 4.9 腿+车轮移动机构的分类

腿的运动	车轮运动	特 征
被动	主动	悬挂机构的扩展
主动	被动	简化复杂程度
主动	主动	具有柔性

第一类在行星探测机器人 Rover 上得到了应用^[2,3]。它在车轮移动机构的基础上扩

展成悬挂机构,这样增加了车轮相对于车体的运动自由度,提高了对不平整地面的适应性,而以往车轮与车体固定的结构是无法适应的。前面的图 4.16 中介绍了 NASA 开发并用于火星探测的小型移动机器人。它的 6 个车轮安装在手臂长连杆的末端,能沿上、下做较大幅度的运动^[2]。

第二类在主动驱动腿脚的基础上又附加了被动车轮。一般来说,如果混合式结构只是简单的叠加,那么只会招致驱动自由度和质量的增加,使系统趋于复杂化。即使有这样的缺点,人们往往也青睐这样的系统,原因在于混合式机构毕竟有突出的优点,关键在于如何设法克服上述缺点。

图 4.154 的混合式机构在设计中就注意到克服缺点^[4]。图 4.154 中的四足步行机器人脚部有圆盘,可以兼作车轮。步行状态时,圆盘朝向移动面充当脚踏面,不使脚部下沉。改到平坦地面上进行高速移动时,如图 4.154 所示,又可以将圆盘立起来,用作车轮。不过车轮没有驱动自由度,仅能围绕轴自由旋转。机器人前进、后退的驱动方式有点像滑冰后退时脚部的动作,即让 4 条腿相对于前后方向左右腿一会儿合拢,一会打开(图 4.154 右)。在这个例子中,虽然脚部有车轮,但无驱动,不会增加它的重量,为腿部运动设计了很好的动作,实现了仅用腿脚无法达到的移动速度。总之,第二种类型的车轮无主动驱动,而又要实现高速移动,因此需要独出心裁的设计。

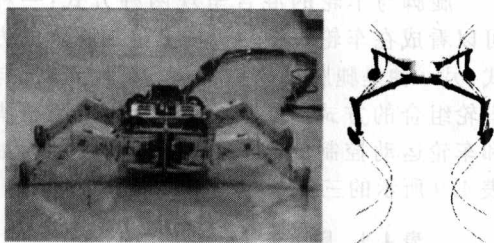


图 4.154 Roller-Walker^[4](东京工业大学)

第三类属于腿脚、车轮均为主动的混合式驱动机构。它们虽然有上述缺点,但由于腿脚和车轮都被驱动,因此提高了对于不平整地面的适应性。

图 4.155 是一个左右独立驱动式的车轮

移动机构,由于脚部带有从动轮改善了姿态的稳定性和对障碍物的适应性^[5]。图 4.156 是一个轮式移动轮椅,为了跨越台阶而附加了腿的移动机构^[6]。如图 4.156 所示,若碰到台阶,则腿将包含车轮的车体抬起,跨越台阶。如图 4.156 右侧所示,碰到沟槽也同样利用腿,一面支撑车体,一面驱动前进,以防止车体(车轮)陷入沟槽中。图 4.157 的设计是在六足步行机器人的脚部配置车轮,而且全部是主动驱动^[7]。它的特点是能在敷设管道的平地上边跨越障碍物、边实现移动。

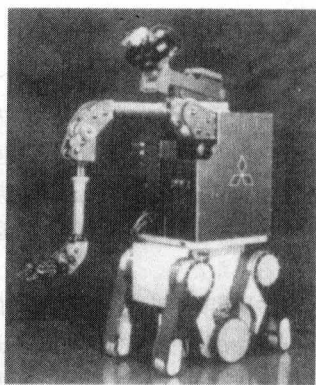


图 4.155 四足 6 轮式移动装置^[5]
(日本三菱重工业)

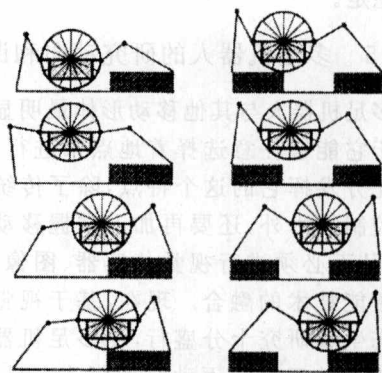


图 4.156 轮腿式机器人^[6](东北大学)

图 4.158 是脚部配置了车轮的双足步行机器人,在平坦地面上试图借助于车轮实现快速移动^[8]。该设计需要增加脚部驱动,所以无法避免混合式机构所引起的缺点。该机器人设想的移动环境包含室内台阶。如果是在室外环境下,地面上有严重的凹凸起伏,那么可以选用图 4.159 和图 4.160 分别表示的

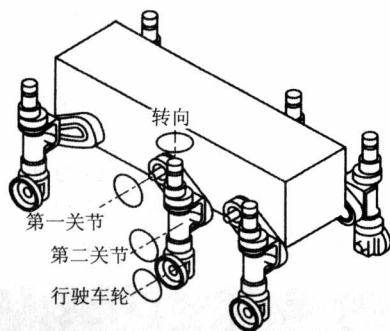


图 4.157 六足-车轮混合式移动装置^[7]
(极限作业机器人技术研究会)



图 4.160 Work Partner 机器人^[10]
(芬兰的赫尔辛基工业大学)

2. 躯干与车轮的混合

所谓躯干式移动机构，是指像蛇那样靠细长身躯的弯曲，或者像蚯蚓那样靠体节伸缩获得推进力从而前进的移动方式。一般机械系统很难模仿生物体的形态实现上述运动方式。因此，人们研发了一种机构，让每个体节都带有车轮，躯干可以弯曲，虽然有车轮，但它无旋转驱动，而是沿圆盘的切线方向旋转，利用与此垂直方向上的运动约束特性，将沿躯干长度方向合成的力作为推进力产生移动推进。其详细内容将在 4.5.2 节中进行叙述^[11]。

将车轮驱动机构模块化，并让它们多个串连连接构成移动体。尽管躯干本身无移动能力，但可以利用躯干对不平整地面适应性强的优点，与车轮组成混合式机构。图 4.161 所示的例子中每个模块只有一个车轮，相邻模块之间有沿铅垂轴方向平移和围绕它旋转的两个运动自由度^[12]。图 4.162 中的每个模块都具有两个独立驱动的车轮，用连杆将多个模块连接起来组成移动机构。在该例子中，连接模块的连杆具有两个旋转自由度和一个平移自由度^[13]。这些自由度无独立驱

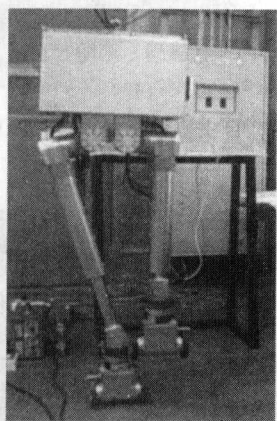


图 4.158 轮腿式双足移动系统^[8]
(日本产业综合研究所)



图 4.159 Octopus^[9]
(Autonomous System Lab., EPFL)

Octopus 机器人^[9]和 Work Partner 机器人^[10]。Octopus 机器人包含车轮在内总共有 15 个自由度，其中有 14 个驱动自由度。Work Partner 机器人的每条腿驱动有 3 个自由度和车轮旋转，共计 4 个驱动自由度，既能在平地高速移动，又能适应不平整的地面。

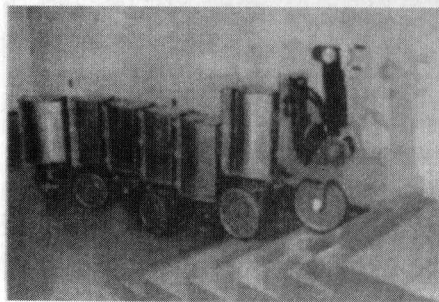


图 4.161 体节躯干型移动机器人
“蛟龙 2 号机”^[12](日本东京工业大学)

动,只是边检测运动状态,依此改变多个车轮的驱动状态,以这样间接的方式来实现控制。整个移动机构的目标是沿不平整地面快速移动。

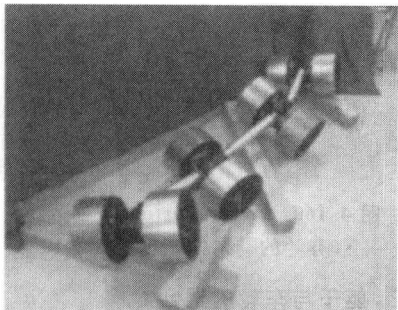


图 4.162 连接型多轮移动机器人
“玄武”^[13] (东京工业大学)

3. 其他的混合式机构

上面介绍了以车轮为中心的混合式机构,其实还有其他组合形式,如腿脚与履带、履带与躯干、躯干与腿脚的组合。关于躯干与腿脚的组合,可以举出蜈蚣等生物体的例子,不过机械系统实现起来比较困难,与其他的组合相比没有优势,故目前尚无研究的例子。

履带与躯干组合的例子可以举出如图 4.163 所示的机构^[14],它用关节将三组履带连接起来,在三维约束的移动空间,或者移动体支撑面分离的移动环境中,它显示出很好的移动性能。另外,还有一个如图 4.164 所示的移动系统,它虽然不能算做一体型的移动机构,但在履带式移动机构上都搭载了手臂,多个移动体通过手臂进行连接;它的移动功能极强,甚至在单独移动体难以适应的不平整地面上它也无妨^[15]。可以说,由于履带和

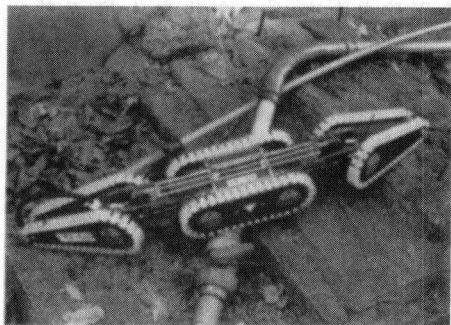


图 4.163 瓦砾中推进的连接式履带车^[14]
(东京工业大学)

躯干对不平整地面的适应性都很强,它们组合起来,适应能力就更强。换一个视角,把手臂视为腿脚,则它们也可以看成是履带与腿脚的混合式机构。图 4.165 是一种正在研究中的移动机构,显然它属于腿脚与履带的组合机构,能同时实现在不平整地面上的快速移动,以及腿脚跨越障碍物的功能^[16]。

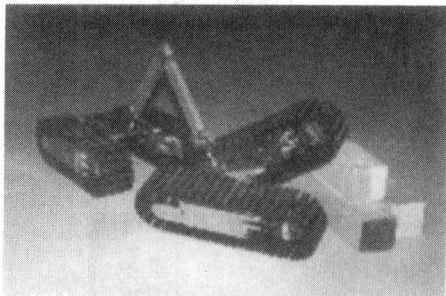


图 4.164 自主协调机器人“群龙(GR)”^[15]
(东京工业大学)



图 4.165 混合式移动机构^[16]
(机械技术研究所)

小森谷 清

4.5.2 蛇形(超冗余)机构

1. 概述

所谓蛇形机器人,是指“串联连接多个能够主动弯曲的单元体,构成索状超冗余功能体”。蛇形机器人既能像蛇那样在地面上爬行,也能充当机械手,利用部分躯体缠绕对象,人们特别关注的是如何有效地利用它躯体形状所产生的细长、灵活、柔软的屈曲运动来实现以下功能:

① 凡是头部单元体能够通过的场所,全部单元体均能够通过,因此适合在狭窄且弯曲的路径上移动。

② 借助于单元体的相互运动,能爬越凹凸地形或翻越障碍物,即在不平整地面上的移动能力强。

③ 由于整个躯干分散了自重,故能适合沙地等松软地面的移动环境。

仔细观察蛇形机器人机构,还可以举出它具有的以下一些特征^[17]:

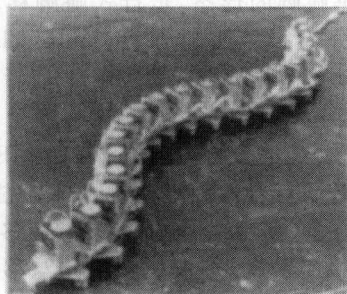
④ 躯干由多个单元体构成,形成超冗余的高可靠性系统。

⑤ 无须各单元体进行无限圆周旋转,因此比较容易满足气密性的要求,适合水陆两栖移动体。

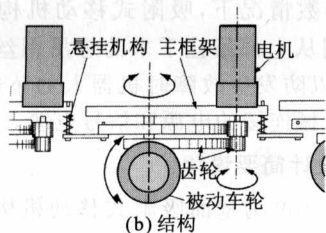
具有上述特征的蛇形机器人在野外排雷作业、倒塌建筑物下的紧急救援作业、工厂管道内部诊断等场合有广泛的应用前景。

2. 机构

图 4.166 所示的蛇形机器人是世界上首次实现蛇的典型行进,即匍匐滑行的 ACMⅢ (Active Cord Mechanism Ⅲ)^[17]。ACMⅢ 在二维平面内运动,它由体节串联而成,各个体节具有围绕垂直轴使躯干屈曲的电机,靠各节的被动车轮能方便地实现沿躯干切线方向发生滑动,而沿躯干法线方向不发生滑动的蛇的摩擦特性,从而生成推进力。近年来,人们开发了多种能实现立体运动的蛇形机器人,它们各具多种功能。



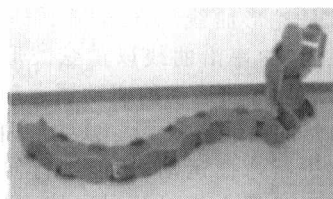
(a) 外形



(b) 结构

图 4.166 蛇形机器人 ACMⅢ^[17]
(日本东京工业大学)

图 4.167 给出了三维蛇形机器人“ACM-R3”,它的单元体带有使躯干屈曲的电机和被动车轮,单元体一面围绕躯干轴转过 90° 相位,一面彼此首尾连接。^[18]。对于躯干所有可能的形状,被动车轮始终都能够支撑躯干,因此 ACM-R3 能够实现多种多样的移动形式。图 4.168 是一个气动蛇形机器人“Slim Slime

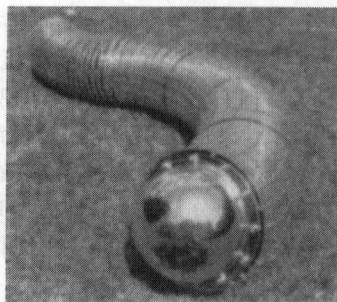


(a) 外形

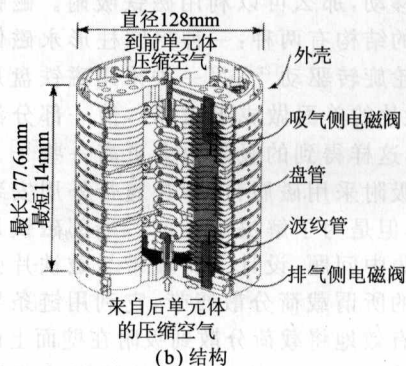


(b) 结构

图 4.167 三维蛇形机器人 ACM-R3^[19]
(日本东京工业大学)



(a) 外形



(b) 结构

图 4.168 气动蛇形机器人 Slim Slime
Robot-I^[20] (日本东京工业大学)

Robot-I”^[19],它的单元体设计很有特点,是由围绕躯干轴成相同间隔的3个柔软气压容器(波纹管)组成的。各节能进行三维屈曲运动和伸缩运动,从而模仿包含蛇在内的自然界中细长躯干动物的运动。

3. 移动形式

使躯干弯曲面移动的蛇形机器人的理想躯干形状是蛇形曲线 *serpenoid curve*。蛇形曲线表现为“曲率沿曲线以正弦波形状变化的曲线”,进行弯曲运动的驱动器运动的光滑点是最自然的曲线形状^[17]。该蛇形曲线是以不仅能够进行弯曲运动,还能进行伸缩运动的三维蛇形机器人作为对象,扩展为能描述多种多样的移动形式^[20]。

大野英隆

4.5.3 壁面吸附式移动机构

1. 壁面吸附式移动机构的结构

从事油罐或结构物壁面的检查等作业时,有时会遇到无搭建脚手架的条件,或者搭建脚手架在作业时间或成本等方面受到限制的场合。此时,吸附式自动行走机器人有了用武之地,它无须脚手架即可沿壁面爬行^[21]。

壁面吸附式移动机构是将移动机构(车轮、履带、腿)与将它吸附在壁面上的吸附机构(磁铁、吸盘等,根据使用环境选择)组合起来实现的。吸附机构有两类:一类装在移动机构内;另一类属于分离式,需要根据现场使用条件来选择。例如,在有可燃性气体的环境下应杜绝火花等。

如果在燃气罐、船舶等铁制结构物的壁面上移动,那么可以利用磁铁吸附。磁铁式车轮的结构有两种:一种将圆柱形永磁体作为车轮旋转驱动^[22];另一种采用磁铁盘片车轮(盘片的单面做成永磁体),使一部分浮起前进,这样得到的吸附力会更高一些^[23]。履带式吸附采用磁履带,即在履带外周安装磁铁片,但是为了解决履带前后端部磁铁片的载荷集中问题,设计了将履带与磁铁片弹性连接的所谓载荷分散履带,它利用链条导向机构有效地将载荷分散到吸附在壁面上的所有磁铁片上^[24]。基于磁铁的腿脚式吸附方式,可以举出步行式壁面吸附移动机器人的例子,它的腿脚末端安装有内部力补偿型的

磁吸附单元^[25]。

至于在吸盘内部产生负压的方式,一种是采用排风机等驱动,造成吸附面内部压力比大气压稍低,但这种智能产生的低负压,需要较大的吸附面积,因此在更多的场合人们选择了高负压方式,它利用喷射器或真空泵来实现高负压。不过,移动面的粗糙度和凹凸起伏情况对吸盘方式的吸附力产生了很大的影响。为了克服这一点,人们开发了扫描型吸盘系统^[26]和VM吸盘^[27]。前者由多个吸盘轮流扫描吸附,这样即使墙面有龟裂或沟槽也无碍吸附力的保持;而VM吸盘通过阀门将多个小吸盘与吸盘内的公共腔连通,如果工作时某些小吸盘的泄漏严重,就将它们的阀门关闭,以保证其他小吸盘的有效工作。

如果打算设计吸盘式车轮移动机构,那么费脑筋之处是如何在车轮上安装吸盘的问题,即必须另外设置吸盘。在履带式中还有一些新机构,一种是全身用罩壳覆盖,其内部有低压吸附机构,另一种是履带本身带有吸附机构^[28]。如果以腿部作为移动机构,末端需要安装吸盘,此时还应该考虑吸盘的密封材料和支撑的方法,使吸盘在压紧壁面时,不至于因为壁面与吸盘面之间存在倾角差而影响吸附功能。

根据腿脚的形态,步行式腿脚移动机器人可以分为多足两腿方式(*multi-sole biped*方式)、动物型腿脚方式两类^[27]。前者是一对框架相互运动,各个框架均具有多个分离的腿脚,完成双足步行或移动,例如MEL-SPI-DER^[29]等。后者由独立驱动的4条腿构成,每条腿有3个自由度,例如4足壁面移动机器人NINJA-I^[30]等。选择腿脚机构与移动面的形状和障碍物的高低等因素有关。

在多数情况下,吸附式移动机构同时设置并使用从上部吊挂下来的悬吊钢丝绳等安全装置,以防发生故障时机器人的坠落,以便保护与机械连接的电源和信号电缆。

2. 设计简要说明

图4.169为壁面吸附式移动机构的基本移动方法,该移动机构在四足的末端配置吸盘,各条腿能够沿着躯体方向平移和沿铅垂方向移动。沿壁面的移动按下述顺序进行:

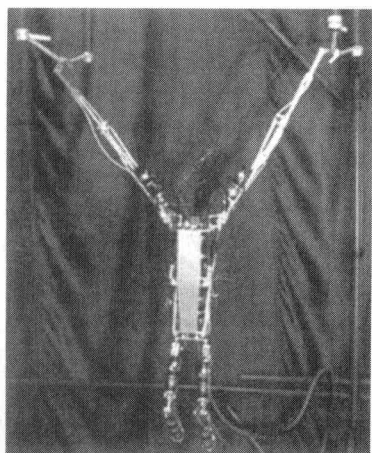


图 4.172 Brachiator III (日本名古屋大学)

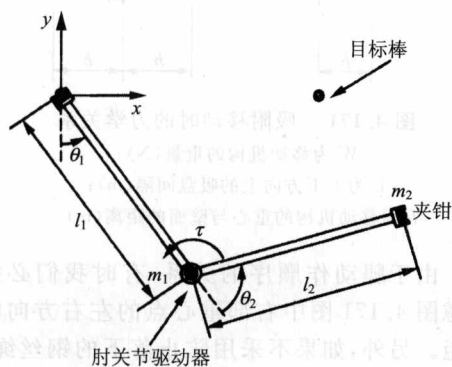


图 4.173 两杆件模型

4.6 水下机器人

1. 移动机构的分类

水下机器人在水中移动的机构可以分为5大类。有不带推进器、借助于拖航绳索在水中或海底被母船或直升机拖航的拖航式,带推进器在水中自主移动的自航式,拖航式与自航式的复合式,自主在海底移动的水底移动式以及模仿水中或水底水栖动物移动机构的仿生式。

2. 拖航式

水下拖航式机器人从母船经由拖航绳索供电,进行实时信息交换,因此可利用声纳、摄像机和测量传感器进行大范围水中或水底调查、海底电缆和管线的检查以及渔网的观察等作业,故它的应用范围很广。母船拖航时,如果在水面附近(水深几十米处)可以实现高速拖航(约10节(1节=1852m/h)),随

着深度的增加,缆绳所受到的阻力作用也会增加,允许的拖航速度渐渐下降。水下拖航深度控制和横向移动控制的方法很多,如利用调整拖航速度和母船绞车的拖航绳索长度控制深度的方法、配置多个船翼的方法(Flying Fish^[1](图4.174)、配置多个 Triaxus 3D Undulating Vehicle(图4.175)和圆柱滚子(例如, Magnus tow, 图4.176))、使用定深器(它安装在拖航绳索的下端,靠质量使拖航绳索下沉到规定深度)沿拖航绳索靠水下拖航体船翼(升降舵)升降的方法等^[2]。



图 4.174 Flying Fish(九州大学应用力学研究所)

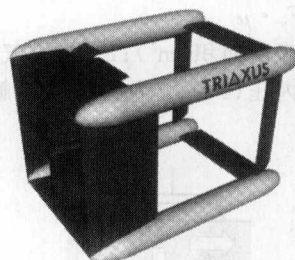
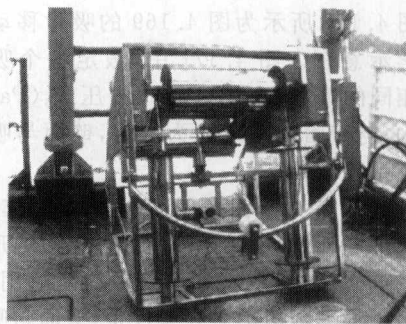
图 4.175 Triaxus 3D Undulating Vehicle
(MacArtney Underwater Technology)

图 4.176 Magnus tow(Eco-Line FRANCE)

水平翼的作用是产生上下方向的控制力,垂直翼的作用是产生左右方向的力。图4.174仅进行上下方向的移动,图4.175不仅

能沿上下方向进行移动,还能沿左右方向进行移动。

图 4.176 采用水平圆柱滚子及垂直圆柱滚子,利用马格纳斯效应(对置于均匀流体中的旋转圆柱产生既垂直于流向又垂直于圆柱轴方向的流体力的现象)达到上下和左右移动。

深度控制和横向移动控制的可控深度可达几百米,如果要更深,那么控制深度的办法可以改成降低拖航速度,增加拖航体的质量,调整母船绞车拖航绳索的长度等。这是由于缆绳的流体阻力,使移动控制变得很困难。如果需要用摄像机进行海底调查实录,那么就要求低速(0.5~2 节)巡航,在海底几米高度的范围内实行高度控制,为此需要从拖船体将链条下垂测量它的高度,或者利用声纳进行高度测量(Deep Tow^[3](JAMSTEC)(图 4.177))。

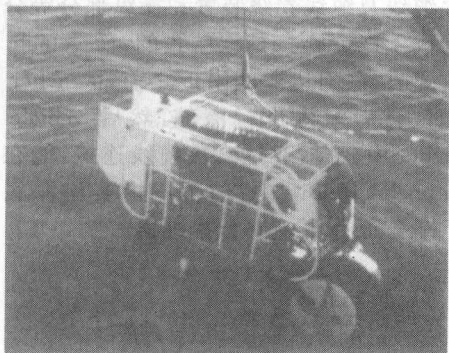


图 4.177 Deep Tow (JAMSTEC)

3. 自航式

自航式水下机器人有两种:一种与母船之间有缆绳(有索式);另一种与母船之间无缆绳(无索式)。无索式属于基本上以一定速度巡航的航行器。有索式在多数情况下都从母船获得供电,而且带有机手,可作业。

为了进行移动控制,自航式水下机器人上通常装有多个带导管的螺旋桨推进器(图 4.178),用 AC 或 DC 无刷电机或液压马达驱动,而且都设计成耐压结构。

由于流入导管的水流被加速,或者说导管本身也具有产生推力的作用,因此它能比低流速区单独用螺旋桨驱动产生更高的推力。水下机器人的推进器要求正反两个方向的推力相同,而且即使碰到障碍物也不至于

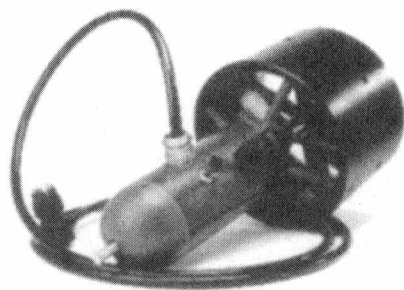


图 4.178 带导管的螺旋桨推进器
(Deep Sea Systems International Inc.)

损坏。可变矢量螺旋桨(variable vectored propeller)用一个螺旋桨可产生任意方向的推力。将螺旋桨的叶片相对于旋转轴呈放射状倾斜安装,在一转之间就能够使叶片的倾斜角发生变化,产生任意方向的推力^[4]。

以恒速航行的航行型无索式水下机器人^[5]的流线型机身上的主推进器的配置形式有两种:一种在机身后部中心配置了 1 台巡航推进器;另一种在机身后部左右舷各配置了 1 台推进器。为了能从海面潜航,或者向海面浮起,有时需要铅垂方向的推进器和横向推进器,甚至需要配合使用压舱物。如果仅在机身后部中心配置 1 台推进器,为了在巡航中能上下、左右移动,就需要在机身后部设计水平尾翼和垂直尾翼。例如,“浦岛号”深海巡航探测机器人^[6](JAMSTEC)(图 4.179)装备有 1 台主推进器,水平尾翼、垂直尾翼,在前部和后部的铅垂方向各装置了 1 台推进器,还有 1 台位于机身后部的横向推进器。在机身后部左右舷配置了 2 台推进器的条件下,利用左右推力之差可以实现左右移动,利用水平翼的控制可以实现上下移动。在相对于海底实施高度控制的情况下,为了使机器人具有回避前方障碍物运动的功能,提高上下方向的操纵性能,有的机器人配备

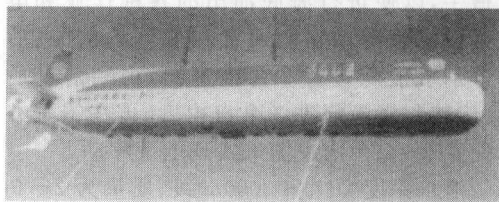


图 4.179 “浦岛号”深海巡航探测
机器人(JAMSTEC)

有用于高度控制的前部水平翼和固定水平尾翼(Aqua Explorer 2(KDDI)^[7,8](图 4.180))。作业(DOLPHIN 3K^[9](JAMSTEC)(图 4.182))。



图 4.180 Aqua Explorer 2(KDDI)

作业型有索式水下机器人的航行速度一般比较慢,可以不用尾翼,而设置若干台各有朝向的带导管的螺旋桨推进器。这种类型的水下机器人从几十千克的小型水下机器人到几吨的大型水下机器人,其应用范围很广。

小型水下机器人主要用于在几百米以内的水深完成水下检查和观测任务。此时,前进后退需要 1~2 个推进器、上下移动需要 1 个推进器、左右移动需要 1 个推进器,即共计需要安装 3~4 个推进器(New Marine Vega(广和)(图 4.181))。

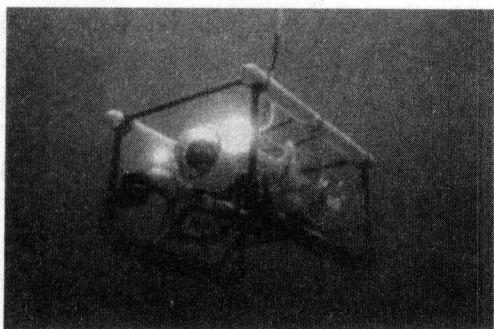


图 4.181 New Marine Vega(广和)

潜水深度 1000m 级、质量为 1~2t(载重 100~200kg)的中型机器人一般需要 15~75kW 的推进器。在多数情况下它们都装有机械手,以便进行海底油田的各种作业和电缆铺设工程等。它们通常在船体的前方、后方分别水平配置各 2 台推进器,得到前进后退、旋转和横向前进 3 个自由度,再在铅垂方向配置 2~3 台推进器来实现上下移动。

潜水深度 2000~3000m 级、质量为 2~6t(载重 200~600kg)的大型机器人便需要 75~150kW 的推进器。推进器的配置与中型机器人相同。它们的任务是实施海底油田等重型

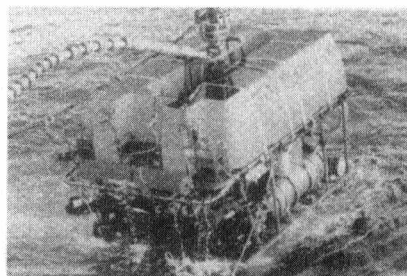


图 4.182 DOLPHIN 3K(JAMSTEC)

4. 复合式(拖航式与自航式)

图 4.183 所示的“海沟号”水下机器人^[10](JAMSTEC)具有世界上最深潜航深度(11 000m)的能力。它由在海中自由航行的“vehicle”、充当“vehicle”的收放船坞并进行音响调查的“launcher”、与母船连接的光电复合一次缆线及缆线卷绕装置和操纵部分等分系统构成。Launcher 是拖航式的,而 vehicle 是自航式的,在到达海底附近之前,launcher 与 vehicle 合为一体进行潜航,然后 vehicle 从 launcher 中分离,通过二次缆线连接,能在围绕 launcher 100m 左右的范围内实施海底作业。Vehicle 上装有 7 台推进器。

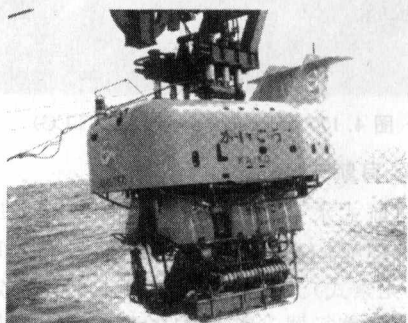


图 4.183 “海沟号”水下机器人(JAMSTEC)

5. 水底行走式

水底行走式机器人具有较大的重量,可以从事海底大反力的重型作业。它在海底的移动方式可以采用车轮式、履带式、阿基米德螺旋推进式、雪橇式、无关节多足式、有关节多足式等许多类型,可以根据地形的复杂程度、凹凸情况、地质构造和硬度、行走速度、作业反力的大小等条件加以选择。

车轮式结构不太适应海底的凹凸地形,若

在海底表面有一定程度的凹凸,其则难以行走。

履带式对于海底的凹凸面的适应性和稳定性都好,也适合于软地基,可以胜任如管线铺设工程、铺设前的疏浚工程等工作。

阿基米德螺旋推进式是把一整条鳍卷成螺旋状,好像一个螺旋状的阶梯。该方式适用于摩擦力小的松软地形或冰面。

雪橇式(Multipass Pipeline Plough(SMD)(图4.184))是在前面两条腿上安装雪橇,在后部安装滑雪板。其质量为80t,可达到250t的拖航力,工作水深可以从浅海到达1500m的深海。它可用于铺设通信电缆、海底铺设管线前的挖沟作业。无关节多足式和有关节多足式步行式对于凹凸面的适应性好,适用于不太需要机动性的水中作业领域。

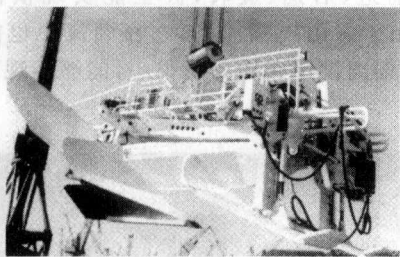


图 4.184 Multipass Pipeline Plough(SMD)

无关节多足式(双叶2号(五洋建设)(图4.185))机器人的腿很结实,可承受大的有效载荷。图4.185中的机器人通过陆地站对其进行遥控操作,在海底用8条腿自动步行,可连续完成自动疏浚作业。

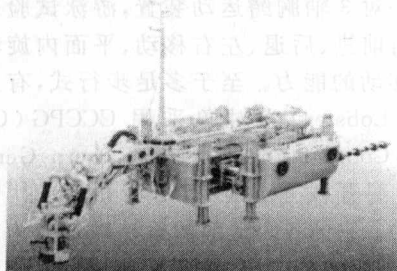


图 4.185 双叶2号(五洋建设)

有足关节式(Aguarobo^[11](港湾空港技术研究所)(图4.186))能够在凹凸地形上移动,便于向各个方向转向。图4.186中机器人研制的用途是确认和检查港湾内投石堤施工的状况。它具有点对称配置的6条腿,各条腿有3个关节,能在±35cm的凹凸面上步行。

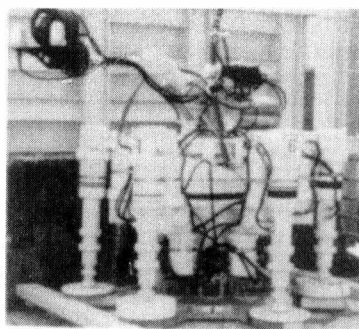


图 4.186 Aguarobo(港湾空港技术研究所)

6. 仿生式

在地球上的海洋、河流、湖泊中有一个动物世界,其间生存着多达数万种的动物。它们是经历了物竞天择后,经过各自的自律运动系统不断进化才生存至今的。以游泳的形态为例,按照推进器官在鱼体上的部位以及可动部分的宽度,可分为正中鳍型、鱼尾鳍型两种,再进一步可以分为波动式、振动式两类(图4.187)。如果打算将水栖动物的推进和

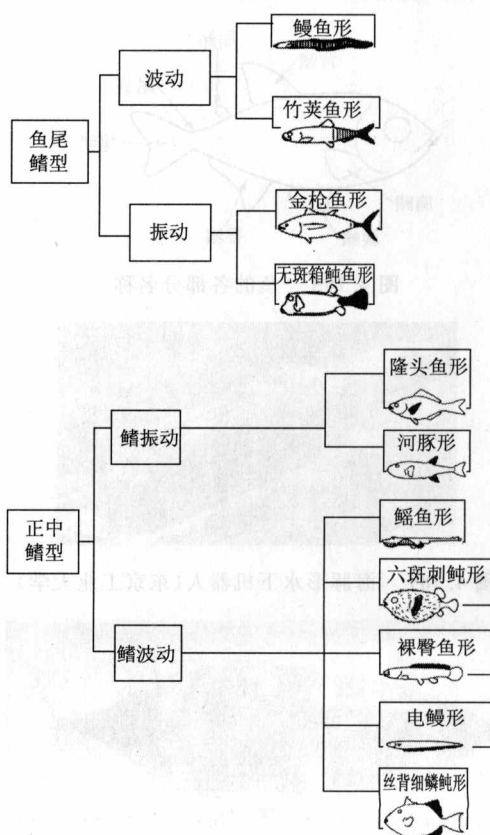


图 4.187 鱼类游泳形态的分类

运动功能用于水下机器人,那么应该大致注重三类功能:一类是鱼尾鳍型的推进功能;另一类是胸鳍等正中鳍型的运动性能;还有一类是模仿虾等海底步行的海底步行型。

有一种水下机器人(海豚型水下机器人^[12](长1.89m)(东京工业大学)(图4.189)),它的鱼尾鳍型振动机构通过尾节(图4.188)的扇摇运动实现尾鳍的上下摇摆和纵摇运动。另有一种设计,相当于将上述尾节和尾鳍换成振动板和振动翼,开发出了一种尾鳍波动型水下机器人(金枪鱼形水下机器人^[13](长2.44m)(Draper Lab.)(图4.190)),它用3个关节置换身体后半部的运动,再与尾鳍根部的关节一起,靠液压缸使4个关节运动。海豚式水下机器人的最大速度为1.9m/s,最大效率为0.65。图4.191^[14]所示的机器人能宛如鳗鱼那样使整个身体以波状运动前进,称为鱼尾鳍形波动式水下机器人。它将身体分为6段,以形状记忆合金丝为驱动器,运动控制采用CPG(Central Pattern Generator)模型,能产生前进后退运动。

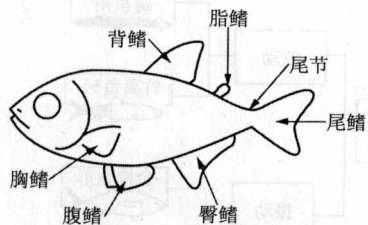


图 4.188 鱼的各部分名称

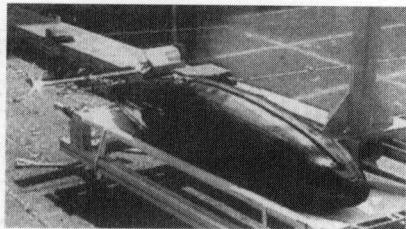


图 4.189 海豚形水下机器人(东京工业大学)

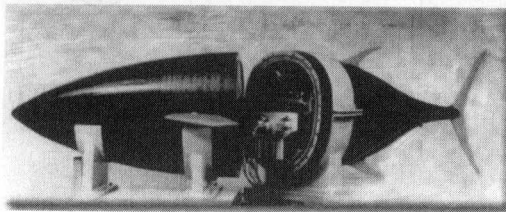


图 4.190 金枪鱼形水下机器人(Draper Lab.)

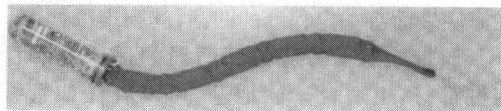


图 4.191 鱼尾鳍形水下机器人
(Northeastern Univ.)

人们根据对大口黑鲈胸鳍的观察,开发出安装了胸鳍运动装置的鱼形水下机器人^[15,16]。它采用正中鳍型鳍振动式,这对于作业型水下机器人的位置和姿态控制很有效。图4.192的鱼形机器人“BASS-II”躯体的左右分别安装了一对胸鳍运动装置,在全长为1m的鱼形身躯的左右装有平板状胸鳍。共计4台电机驱动一对胸鳍运动。通过将前后、扭转运动的组合,该鱼形机器人不仅能够前进、后退、旋转,甚至能够实现横向移动。由于采用模糊控制,它在潮流中也能够移动,偏离设定路径的量很小,能够实现导向控制。

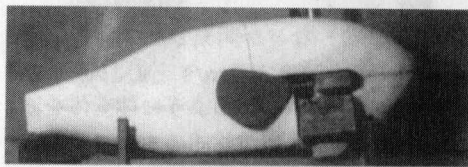


图 4.192 胸鳍型水下机器人
“BASS-II”(大阪大学)

鱼形自律水下机器人“BASS-III”(全长2.0m,质量为104.1kg)(图4.193),它能实现前后、扭转、上下的同时运动,在它的左右安装了一对3轴胸鳍运动装置,游泳试验表明它具有前进、后退、左右移动、平面内旋转及垂直移动的能力。至于多足步行式,有人以龙虾(Lobster)为对象采用CCCPG(Command, Coordinating, Central Pattern Generator)模型开发了反射型步行机器人^[17](图4.194)。它的各个腿部的运动被划分为6个模式,通过实验求出前进、后退、横移、旋转等行动与神经回路振子组成的6个模式的组合关系。该机器人构筑了一个神经回路系统,它包括检测潮流强度和方向以及障碍物的传感器的触须,相关信息被反馈后,按照行动规划,由该系统的中央模式生成单元统一控制8条腿的运动。它的驱动器采用形状记忆合金丝。

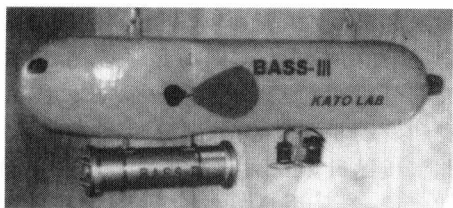


图 4.193 胸鳍型水下机器人
“BASS-III”(大阪大学)

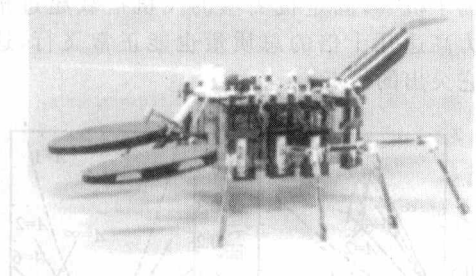


图 4.194 龙虾型机器人(Northeastern Univ.)
加藤直三

4.7 空中机器人

4.7.1 理论基础

1. 运动方程式

空中飞行的机器人如图 4.195 所示,根据以机器人重心为原点的机身固定坐标系($x-y-z$)与空间静止坐标系($X-Y-Z$)的关系,可以确定它的姿态和运动。在空间静止坐标系中,将机身围绕 x 轴的运动称为横摇(roll),将围绕 y 轴的运动称为纵摇(pitch),将围绕 z 轴的运动称为偏转(yaw),它们各自以右螺旋方向为正。机身在空中静止(空中悬停)或以一定速度飞行(稳定飞行)时, $x-y-z$ 的 3 个轴方向的力和围绕它们的力矩必须全部平衡。将该状态称为平衡(trim)飞行。若失去平衡,则会产生加速度运动或角加速度运动。即

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_g}{dt^2} = \mathbf{f}_a + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_e = \mathbf{f} \quad (4.188)$$

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{m}_a + \mathbf{m}_e = \mathbf{m} \quad (4.189)$$

式中, \mathbf{r}_g 为重心的位置向量(图 4.195); \mathbf{f} 为作用于机身重心的外力; \mathbf{f}_a 为空气力; \mathbf{f}_g 为重力; \mathbf{f}_e 为其他的外力; \mathbf{H} 为绕重心的角动量; \mathbf{m} 为绕重心的力矩; \mathbf{m}_a 为空气力产生的力矩; \mathbf{m}_e 为其他的力矩。

若用分量表达式(4.188)及式(4.189),

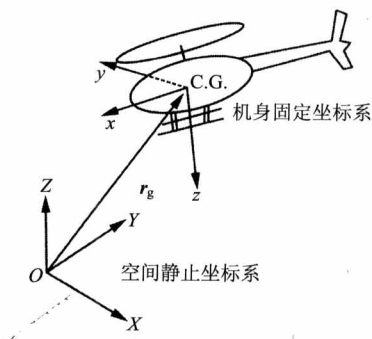


图 4.195 坐标轴与运动

则成为用固定坐标描述的 6 个非线性联立微分方程^[1~5]。空中机器人的控制可以说是通过改变外力 \mathbf{f} 和力矩 \mathbf{m} 来产生所希望的运动。

2. 空中机器人的种类

空中机器人的形式也是多种多样的,如图 4.196 所示,分为固定机翼型(飞机型)、垂直起降型(VTOL 型)、浮力型(LTA 型)等几类。它们各有优缺点,可根据用途和目的来选择合适的形式。固定机翼型靠机翼的升力产生反抗重力的举升力。垂直起降型靠旋转机翼(旋翼)或向下的喷射气流产生的反力,作为向上的举升力。浮力型则借助于氢、氦等轻质气体或热空气的浮力,产生向上举升力。

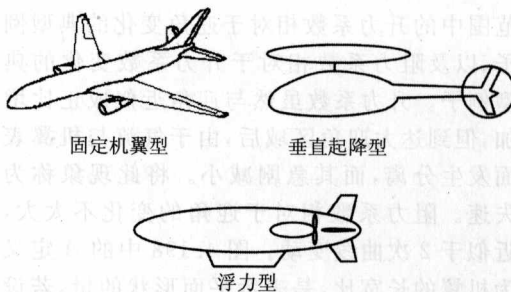


图 4.196 空中机器人的种类

1) 固定机翼型

(1) 固定机翼的特征 图 4.197 所示为机翼的截面。机翼上作用有与空速 U_R 平行的空气动力分量即阻力 D 、垂直的空气动力分量即升力 L 。机翼的基准线与空速所夹的角称为迎角。

用 $(1/2)\rho U_R^2 S$ (ρ 为空气密度, S 为机翼面积)将升力和阻力无量纲化,定义升力系数

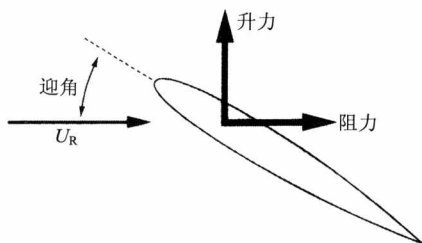


图 4.197 作用于机翼的空气力

C_L 和阻力系数 C_D 。即 $L = (1/2)\rho U_R^2 S C_L$, $D = (1/2)\rho U_R^2 S C_D$ 。定义无量纲的量以后,机翼的大小、黏性、流体密度的变化等均可以用一个无量纲的量(雷诺数) $Re = U_R c / \nu$ 来描述,升力系数和阻力系数可作为雷诺数的函数来处理^[2,6]。式中, c 为机翼截面的翼弦长(前缘与后缘之间的距离), ν 为动态黏性系数,设空气的黏性系数为 μ ,则 $\nu = \mu / \rho$ 。对升力系数和阻力系数产生影响的另一个无量纲的量是马赫数 M 。设空气的音速为 a ,则 $M = U_R / a$ 。随着机翼的空速接近音速,空气压缩性的影响增大,空气动力发生变化。人们将空速比音速足够小的范围($M \leq 0.8$)称为亚音速,将与音速可比的范围($0.8 < M \leq 1.2$)称为跨音速,将超过音速的范围($M > 1.2$)称为超音速。在各自的范围内,空气动力的分析方法不同,升力系数和阻力系数的性质也不同^[1,7]。

图 4.198 所示为 $Re \geq 10^5$ 且处于亚音速范围中的升力系数相对于迎角变化的典型例子、以及阻力系数相对于升力系数变化的典型例子。升力系数虽然与迎角近似成正比增加,但到达大迎角区域后,由于气流与机翼表面发生分离,而其急剧减小。将此现象称为失速。阻力系数相对于迎角的变化不太大,近似于 2 次曲线变动。图 4.198 中的 A 定义为机翼的长宽比,是表示平面形状的量,若设翼展(机翼两端之间的长度)为 b ,则 $A = b^2 / S$ (矩形时为 $A = b/c$)。即 $A = \infty$ 为无限长的二维机翼,随着 A 变小,从长方形向正方形接近。如图 4.198 所示,随着长宽比的减小,失速角增大,升力倾斜(升力曲线的斜率)减小。另外,在某个迎角处出现升力与阻力之比(升阻比)减小的情况。即长宽比大的机翼,升阻比可达 100;反之,长宽比为 1 的机翼,在升力系数为 1 左右时,升阻比最多为 3 左右。

如图 4.199 所示,处于水平稳定飞行状

态的固定机翼型飞行体,其升力与机身总质量是平衡的,推进力与阻力是平衡的,升力的绝大部分由主机翼产生。所不同的是,由于机身和发动机舱等各个部分也会发生阻力,因此整机的升阻比大大小于主翼单独的升阻比。但是,若采用良好的主翼形状和低阻力的机身形状,则在 $Re \geq 10^5$ 的条件下使整机升阻比超过 10 倍并非那么困难。也就是说,借助于机翼,固定机翼型的飞机搭载超过推进力高达几十倍的总质量也能正常飞行,这是它突出的优点。

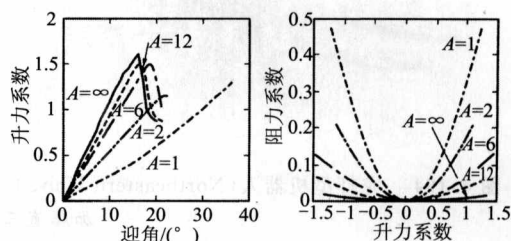


图 4.198 升力系数与阻力系数

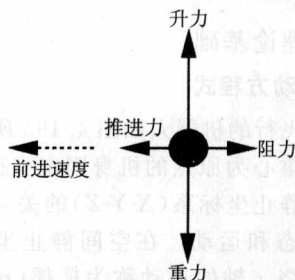


图 4.199 水平稳定飞行时的力平衡

若机翼的雷诺数减小,则气流发生变化,升力系数和阻力系数的性质也随之而改变。升阻比随着雷诺数一起下降,即使具有良好升阻比的翼型也会发生同样的变化。在 $Re \approx 10^4$ 的条件下,机翼的边界层容易从层流转变为湍流,很多时候该现象被用来实现良好升降比的解决办法。在 $Re \approx 10^3$ 的条件下,机翼材料越薄且带有翘度的飞机升阻比会越好。但是,即使翼型优异的二维机翼,改变雷诺数的大小,升阻比最多也只能达到 10 左右。若为 $Re \approx 10$,则无论怎样好的翼型,升阻比也仅为 1 左右。雷诺数再小,机翼就没有实用意义了^[8]。这是在设计小型或低速飞行体时必须要注意的事项。

(2) 固定机翼型的控制 如图 4.200 所示,若在接近机翼后缘部分附加可动区域

(舵),使它能够上下弯折,则能够起到增减升力的作用。实际上,固定机翼型的控制全部都采用这样的结构。如图 4.201 所示,机身的横摇、纵摇、偏转运动分别借助于专用舵来控制。各个舵设置在与产生对应运动的机身轴相距最远的位置,使舵面能够最大程度地发挥有效的作用,而且还不与其他运动耦合。辅助机翼(副翼)在左右以相反的相位运动,例如,右边向上、左边向下,那么就将引起横摇运动。左右升降舵以同相位运动,若升降舵面向下,则尾翼升力增加,机身使机头向下,其结果导致主翼的迎角减小,主翼的升力减小,机身下降。反之,若升降舵面向上,则由于相反的机理,机身上扬。方向舵使作用于 y 轴方向的垂直尾翼的升力发生变化,以控制机头的左右方向。机身的左右移动靠横摇运动和偏转运动的组合引起旋转运动的效果。如果仅有偏转,虽然机头会朝向所希望的方向,但由于相对于飞行路线的仅仅推力的横向分量有助于横向移动,因此无法得到足够的响应。若加入横摇,则如图 4.202 所示,机身发生倾斜,产生升力的横向分量,它与离心力平衡,就能得到足够的响应。因为所有的力都能达到了平衡状态,能够以一定的速度进行旋转,所以将此称为稳定旋转(平衡旋转)。如上所述,我们必须注意,固定机

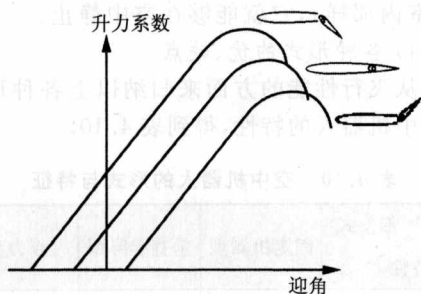


图 4.200 舵与升力系数

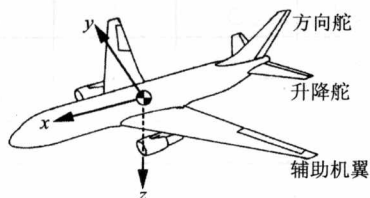


图 4.201 舵

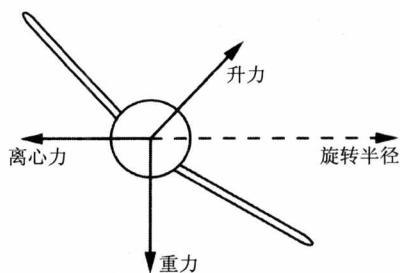


图 4.202 平衡旋转

翼型的上下和左右的移动是与机身的旋转运动相耦合的,由于机身的惯性矩作用,运动容易产生时间滞后。

2) 垂直起降型

(1) 垂直起降型的特征 这种形式的机身使用旋转机翼或喷气,通过产生与重力平衡的上推力而实现飞行。旋转机翼有旋翼与螺旋桨两类。

如图 4.203 所示,旋翼的翼片有关节,按照飞行员的控制,使作用于翼片的空气力与离心力的平衡发生变化,结果使旋翼旋转面相对于旋转轴产生任意倾斜。螺旋桨固定在旋转轴上,不能使旋转面相对于旋转轴倾斜。垂直起降型空中机器人是靠发动机产生推力来支撑自重的,因此为了飞行,推力必须大于自重。如前所述,固定机翼型能搭载比推力大几十倍的重量,由此可见与固定机翼型比较起来即使机身重量相同,垂直起降型空中机器人需要更大功率的发动机和更轻型结构。不过它也有突出的优点,就是能够在空中静止(空中悬停),还能够垂直离地或着陆。

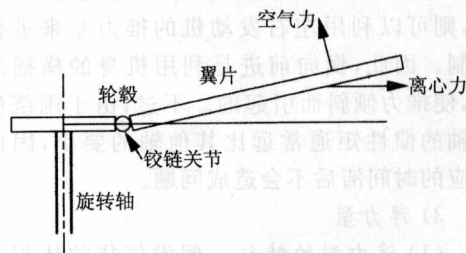


图 4.203 旋翼和关节

在空中静止飞行中,所需的功率与下吹速度的立方成正比。为了实现高效率的低速或空中静止飞行,最好以尽可能低的速度将尽可能多的空气向下吹。可见,在该飞行领域中,效率的顺序是旋翼、螺旋桨、喷气。在

设计机身的形式时也应该重视如何适合低速或空中静止飞行的要求。

(2) 垂直起降型的控制 若采用旋翼,则能够自由地控制推力的大小和方向^[1,9,10]。

如图 4.204 所示,旋转面能按照驾驶员的控制自由倾斜,推力几乎与旋转面垂直。如果采用翼片,通常在控制输入后翼片经过 2~3 圈,旋转面的倾斜响应即告完成,推力的响应特性极快。由于推力的大小与总质量近似相等,因此最大在前后、左右方向能够产生 0.2g 左右的瞬时加速度,在上下方向能够产生 0.1g 左右的瞬时加速度。

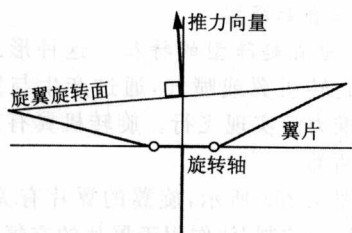


图 4.204 旋翼旋转面与推力

若采用螺旋桨,旋转面是无法相对于机身而产生倾斜的,因此必须控制推力方向使整个机身倾斜,与旋翼相比,机身巨大的惯性矩容易造成响应上的滞后。另外,为了使机身绕各个轴倾斜,还需要辅助叶片等控制系统。不过,螺旋桨与旋翼相比也有一些优点,如结构简单、不容易引起故障。

我们在海鹞垂直起降战斗机上看到,如果使用喷射气流,那么改变气流下吹的方向,就可以控制纵摇、偏转等运动,至于横摇运动,则可以利用左右发动机的推力差来进行控制。因此,横向前进是利用机身的横摇运动,使推力倾斜而引起的。不过,由于围绕横摇轴的惯性矩通常远比其他轴的要小,因此响应的时间滞后不会造成问题。

3) 浮力型

(1) 浮力型的特征 假设气袋的体积为 V_i , 内部的气体密度为 ρ_g , 则浮力可由式 $(\rho - \rho_g)V_i g = \rho(1 - \rho_g/\rho)V_i g$ 求出。除了热气球以外,其他浮力型空中机器人产生浮力时并不需要燃料,因此它允许长时间飞行。但是,浮力的方向是固定的,改变其大小也比较难,因此形成控制力不大容易。为了改变浮力的大小,虽然可以改变气袋的体积,但短时间内让

体积变大相当困难,操纵时间常数大的气袋上升或下降是一件十分消耗精力的事情。浮力型空中机器人应该选用大而轻的气袋,在估计空气动力时不能忽略视在质量这一项。以氦气为例,设 15°C 、 1atm 的空气密度 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, 在干燥状态下氦气的 $\rho_g/\rho = 0.137$, 于是得到,在空中升起 1kg 的质量,必须用 0.95m^3 容积的气袋。

(2) 浮力型的控制 对通常的飞艇来说,上下方向的移动是靠气袋体积的变化来实现的,前、后方向移动由螺旋桨的推进力的变化而产生,左、右移动方向则是利用方向舵改变机头方向,结果使推进力产生横向分量。纵摇运动靠浮力中心的移动或升降舵控制,偏转运动靠方向舵控制。横摇运动虽然能借助于重心位置与浮力中心的上下差自动满足稳定性,但无法人为地对其进行改变。与机身的质量、惯性矩、空气的视在质量相比,除了推进力以外,上述控制力和力矩均极小,响应特性迟缓,因此浮力型飞行体的操纵性能极差。特别是在处于低速时,舵面的作用很差,除了前后方向以外,控制性不好,着陆时需要用许多根绳索从地面上来约束机身。如果有阵风,那么浮力型空中机器人无法实现对地面的静止飞行,势必随风飘浮。但是,这样的机身结构的稳定性好。另外,如果环境无风(像室内那样),它就能够空中静止。

4) 各种形式的优、缺点

从飞行性能的方面来归纳以上各种形式的空中机器人的特性,得到表 4.10。

表 4.10 空中机器人的形式与特征

形式 飞行特性	固定机翼型	垂直起降型	浮力型
高速飞行	○	×	×
空中静止	×	○	△
长距离飞行	○	×	△
长时间飞行	△	×	○
阵风响应	△	○	×
承载量	○	×	△

3. 机身设计

机身的设计,首先应该根据用途来选择形式,然后按照如图 4.205 所示的步骤开展

设计。在图 4.205 中,性能计算是针对机身的静态性能进行考察,包括计算承载量(有效载荷)、续航里程、续航时间、起降性能、升限等。为了进行这些计算,需要估计作用于机翼、机身各部分的空气力,此时可以借助于公开发表的庞大的数据库(例如,对于机翼可参阅文献[2],[6],对于机身各部分可参阅文献[1],[2],[11~13])。

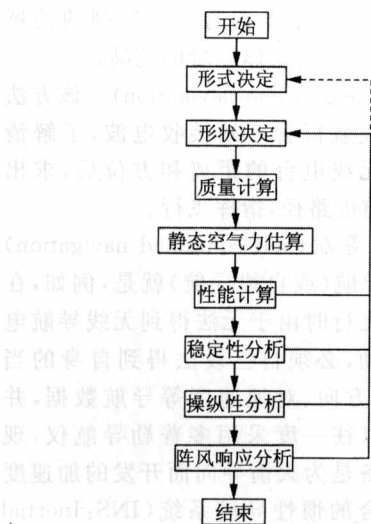


图 4.205 设计步骤的一个例子

图 4.205 中关于稳定性和操纵性的分析,虽然多数情况下是采用式(4.188)和式(4.189)进行数值计算,但往往也根据式(4.188)和式(4.189)推导线性方程,借助于各种线性控制理论对其加以分析。在线性化方法中,可以举出近年来开发的逆动力学法^[14]和下述的微扰动法^[1,3~5]。微扰动法认为,一架在某平衡点做稳定飞行的飞机,如果由于干扰或控制而引起了微小加速度运动,那么允许忽略 2 次及 2 次以上的微小运动量,外力也可以只保留泰勒级数展开的 1 次项,忽略 2 次及 2 次以上项,以推导出线性方程来。显然,每次平衡点发生改变时,运动方程的系数也就发生了变化,而且扰乱微系数的推算和检验也是非常麻烦的工作。一般来说,求得方程的工作远比随后的分析要麻烦得多。目前,针对固定机翼型已经开发出两种求得微系数的标准方法^[1,3,4,15],至于其他空中机器人,目前尚无标准化的方法。事实上,不同的研究者分为几种流派。

图 4.205 中阵风响应分析的任务是研究阵风的强度和性能,可以将孤立阵风模型假定为阶跃波或正弦波,连续阵风模型应该根据实际阵风的统计规律建模^[16]。空中静止飞行特别容易受到阵风的影响,应该从长年对直升机研究积累的数据中,查出操纵所需要的机身加速度和响应特性^[17],并作到满足这些标准要求,这对于阵风中的空中静止飞行是不可缺少的。

河内启二

4.7.2 各种空中机器人

对空中机器人的研究除了以固定机翼型、垂直起降型、浮力型的飞行体为基础对控制和系统应用开展有关研究以外,还有一些研究是针对从仿生机器人学角度考虑的生物飞翔(扑翼型)机理^[18]。在本节中,以前一类空中机器人的应用为对象,介绍当它们用于图像信息采集、环境测量(如大气测量、采样等)、电波中继、物品运输等场合时,如何实现定位和控制的,以及具体的应用事例。

1. 空中机器人

“飞机”的概念一般指利用大气支撑在空中飘浮的机械^[19],日本航空法第 2 条定义飞机为“人乘坐的可供航空用的飞行器”。在航空法第 87 条中对“无人驾驶飞机”的定义是人能够操纵而无驾驶员也能够飞行的飞行器。根据上述定义,模型飞机和广告宣传用无人飞艇等基于无线操纵的、在性能和结构方面无法搭载人的机械不属于飞机。再根据航空法第 1 条“飞机的航行安全和防止航行引起的故障”来看,这些飞行的飞行范围应该受到限制。具体来说,按照航空法第 99 条第 2 款的规定,凡是超过航空法第 81 条规定的最低安全高度(根据法律施行细则,距离地面为 300m,在机场附近为 150m)的飞行都将被视为对飞行产生影响的行为,进入那个范围就不允许自由飞行。

飞机制造事业法和飞机制造事业法实施令规定,“用于法令规定的航空领域的设备为,即使是飞机和旋翼飞机,若在结构上无法搭载人时,总重量(指设计规定的装备、燃料和其他装载物,并且实际搭载在飞机上)必须

要超过 100kg。因此属于这一类的无线遥控飞机必须根据法令的要求来制造。

2. 控制

1) 分层控制

如果是固定机翼型结构的空中机器人,那么它的控制可以大致划分为三级:第一级是基本控制级,是针对螺旋桨、升降舵、方向舵等飞行体机械部分的控制;第二级是机身空中姿态、速度的控制级,通过上述机械部分控制的组合来实施;第三级是位置和高度控制级,使飞机沿预先设定的路径飞行。所有这些控制都与飞行机械的控制密切相关。

在空中机器人的飞行中,无线通信是必不可少的。必须根据飞行的内容,对飞行员显示机身的位置信息等,但由于使用电波的频带的原因,数据的传送量受到限制。在这样的通信限制条件下,必须构成一套系统,才能对飞行员显示必需的信息。

APS(Automatic Pilot System)也称为自动驾驶系统(自动驾驶仪),该系统最初的目的在于保持方位和姿态的稳定,以及飞行的高度。现在,它的功能已经被拓展了,特别是直升飞机,由于易受到本身惯量、阵风等因素的干扰,机身难以控制,提供稳定方面的功能对于改善飞行员的驾驶能力很重要^[20]。这些功能如下:

① 使机身姿态稳定(包含对于干扰保持稳定的功能)。

② 上升或旋转等的控制功能(操纵功能)。

③ 接受导航装置发来的位置信息,自动驾驶飞机飞行到达目的地(导航功能)。

为了实现这样的控制功能,根据用途可以选用陀螺、加速度计、方位计、高度计、GPS 等传感器。

2) 导航

为了使飞机能正确飞行到达目的地,必须始终测量自身的现在位置,了解到达目的地的距离、方向等参数。导航(navigation)是实施上述测量并根据测量结果正确维持前进方向完成飞行的方法^[21,22]。

(1) 地标导航(pilotage navigation) 该方法通过查询地面上的物标和航空地图,确认本飞机的位置,帮助飞行。从拍照图像和地图信息自动搜索路径的方法也属于此列。

(2) 推测导航(dead reckoning navigation)

这种导航基本上就是计算方位和距离,再考虑风向、风速推测出从已知地点到达目的地的路线,指挥进行飞行。

(3) 天体导航(celestial navigation) 该方法是借助于六分仪观测位置已知的天体的高度和方位,由观测时间从天体测量计算表中求算当前的位置。人造卫星将太阳传感器、恒星传感器等充当它的姿态控制的传感器,也应该将其列入天体测量的范畴。

(4) 无线导航(radio navigation) 该方法是从地面无线航行管理站接收电波,了解清楚了其相距无线电台的距离和方位后,求出自身位置和前进路径,指挥飞行。

(5) 自主导航(self-contained navigation)

所谓自主导航(或自律导航)就是,例如,在太平洋上空飞行时由于无法得到无线导航电波通信的帮助,必须自己设法得到自身的当前位置、正北方向、对地速度等导航数据,并指挥飞行。以往一度采用多普勒导航仪,现在的主流设备是为火箭导向而开发的加速度计与陀螺组合的惯性导航系统(INS: Inertial Navigation System)。

(6) 卫星导航(satellite navigation) 卫星导航是使用 GPS 等测位卫星了解三维位置、速度、时间的导航方法。由于 INS 位置信息随着时间的推进会产误差累积,因此导航的方法已经过渡到 INS/GPS 复合导航系统,该系统利用 GPS 进行数据更新,能保证具有更高的精度。

1991 年,ICAO(国际民用航空组织)承认 CNS/ATM (Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management) 系统作为新的航空安全系统,并不断将它进行完善。在飞机与地面之间构筑了以 VHF 频带频率进行数据通信的系统。通过给飞机安装卫星通信系统(SATCOM),CNS/ATM 将数据通信线路扩展到卫星,处理的数据也扩展了。借助于该系统可以帮助飞机从 GPS 等测位卫星得到的位置信息能够通过通信卫星与航空交通管制机关进行数据通信,从而提高航空交通的安全性,扩大交通容量。

3. UAV

无飞行员搭乘和驾驶的飞行器称为无人

飞行器(UAV; Unmanned Aerial Vehicle 或 Unpiloted Aerospace Vehicle)。人们对 UAV 做了各种各样的研究,它适合的用途,如有用照相机、红外线照相机、光谱照相机等进行地表面的环境测量,搭载传感器和采集装置进行的大气观测和采样,农药喷洒等。

关于 UAV 的开发有两种趋势:一种是属于飞机制造的延伸;另一种是属于 RC 模型飞机和直升飞机的延伸。前者的一些技术与一般飞机是相同的,例如机内装置之间的数据总线都依据 MIL-STD1553B 等。

1) 固定机翼型

固定机翼型 UAV 有许多种。例如,以罗加洛回收翼作为主翼的 UAV“无人飞机”(图 4.206),它的全长约为 2.2m,机身质量为 18.5kg(除燃料和电池以外),通过设定飞行航线,能完成自主飞行。另外,它还安装有飞行记录仪,能自动记录时间、纬度、经度、飞行方位、机身方位、海拔、气压、对地速度、作业内容等,重放该飞行记录,便能实施反复航空巡视,因此它适用于空中摄影、飞行测量(气态采样)等作业。

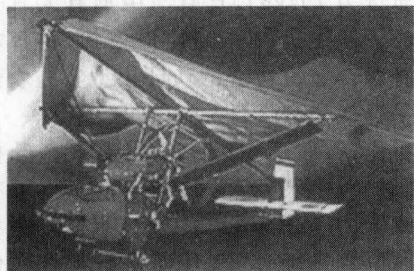


图 4.206 无人飞机(sato. i. system)^[23]

Aerosonde UAV(Aerosonde Pty Ltd.)是 1998 年世界首次横渡大西洋的 UAV,这已经为人们所熟知。它的 Mark III 的翼展约 3m,质量约 13kg,为了便于姿态控制和导航,该机装有 GPS 和陀螺等传感器,能通过基本命令的传送实现自主飞行。它利用 UHF 无线电和 SATCOM 卫星的 Ku Band 与飞行主计算机进行通信,以完成飞行控制^[24]。

NASA 的 ERAST (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology)计划的目标是开发 UAV 和可搭载在 UAV 上的小型传感器。其任务是要完成有人驾驶飞机难以飞行的火山上空飞行或高空飞行,执行

各种观测作业。该计划开发了 Pathfinder、Pathfinder Plus、Centurion 和 Helios 4 种全翼型机身无人飞行器^[25]。

其中,Helios(图 4.207)的翼展约为 75m,由太阳能电池提供能量驱动分别处于 14 台 1.5kW 直流电机上的直径为 2m 的螺旋桨,实现推进。它的升降舵进行飞行中的纵摇控制,再通过调整左右电机的转速达到偏转控制。整机(搭载飞行试验器材)的质量为 725kg,低空飞行速度为 30~43km/h,高空飞行速度为 270km/h。2001 年它成功地完成了 29 524m 的 UAV 的最高飞行高度。Helios 的飞行状况由地面监控,通过遥控进行操纵。随机装备包括在军用机飞行限制区域内遥控飞行所必需的飞行终端系统、按照命令开启降落伞的装置、指示飞机位置的归航信标。另外,一旦失去控制或有突发事件发生,为了确保安全,它能在飞行限制区域内坠落。为了使其在夜间能连续飞行,Helios 装备了燃料电池与太阳能电池的组合系统。人们期待将 UAV 用于超高空飞行,执行追踪暴风雨、大气采样、地表面的光谱分析等任务^[26]。

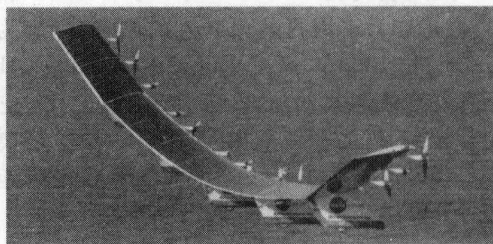


图 4.207 Helios(NASA)

飞艇是日本“平流层平台”研究计划的一个课题,2002 年由通信综合研究所、通信及广播机构、AeroVironment 公司、Sky Tower 公司和 NASA 共同研制成功飞艇 Pathfinder Plus,将其用于平流层无线中继的考爱岛实验。它的飞行高度为 20km,成功地进行了数字电视广播和 IMT-2000 连接实验^[27]。

ERAST 计划则研制了一种新型机身,即 Altair(图 4.208)。它的全长为 10.4m,翼展为 26.2m,搭载 700Hp 的螺旋桨涡轮发动机,能够 32h 连续飞行,可用于对大气中物质的调查或遥测位置辨识。它的升限高度为 15 800m,最大飞行距离为 6700km。它可搭载 340kg 的传感器。Altair 的原型是军用无

人飞机 Predator, 这原是一台翼展为 14.8m、长为 8.22m、续航距离约 700km、巡航速度为 130km/h、升限高度 7620m 的螺旋桨飞机。利用从 GCS (Gound Control Station) 的 C band 或经由 SATCOM 卫星的 Ku Band, 由一个飞行员和两个传感器操作员进行操纵。传感器中装有彩色电视摄像机、红外线探测器、透视云层的合成孔径雷达 (SAR: Synthetic Aperture Radar) 3 台仪器, 靠 LN-100GINS/GPS 系统导航。

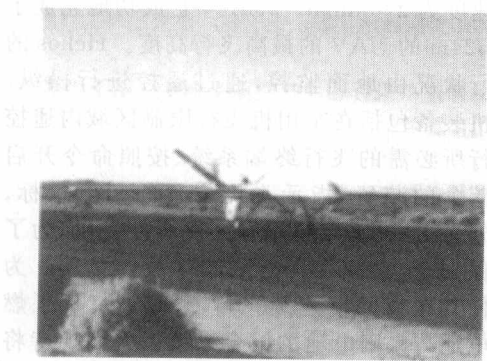


图 4.208 Altair(NASA)

无人喷气机 Global Hawk 与 Predator 相同,也是作为军用目的而开发的,它的翼展为 35.3m、长 13.4m、高度 19 812m、以 640km/h 的速度续航距离约达 22 000km。2001 年,它从美国到澳大利亚飞越太平洋,飞行距离 7500 英里 (12 000km),创下了 UAV 飞行距离的世界纪录。

2) 垂直起降型

垂直起降型也称为 VTOL (Vertical Take-off and Landing Plane)。直升机、鹞式垂直起降战斗机等就属于这一类的飞机,它能够在空中静止 (空中停悬) 或后退,飞行的自由度极高。

(1) 直升机^[30] 直升机有单旋翼、双旋翼两个系列。前者有一个主旋翼,以及抵消旋转转矩的尾旋翼;后者有两个主旋翼,它们进行反向旋转,从而抵消彼此旋翼产生的转矩。在双旋翼系列中,又分为纵列式、横列式、同轴反转式、交叉式等。无人直升机中虽然有同轴反转式,但目前仍以单旋翼系列为多,因此我们将以此为主进行叙述。

单旋翼系列直升机存在一种特殊的飞行现象,即当借助于增大翼片迎角来增加主旋

翼的升力时,会产生与主旋翼旋转方向相反的转矩,使机身旋转,或者在空中停悬中因尾旋翼而引起机身的漂移 (横向滑移),或者因相对机身前进方向,主旋翼翼片左右升力之差对前进方向带来影响等。直升机的基本操作包括前进后退、横向运动、机身旋转、升降、空中停悬等,虽然是同样的操作,但随速度的不同,对机身动作的要求也不一样,操作时都必须考虑如何克服直升机的上述特殊飞行现象。对于无人直升机,就需要装备能满足上述特性要求的姿态控制装置,以提高驾驶的操纵性。

在日本,工业用无人直升机的研究始于 20 世纪 80 年代,由农林水产航空协会主持用于农药喷洒的无人直升机应用研究。从 20 世纪 90 年代起正式作为商品销售,在 2001 年有 7 种机型约 1400 架在日本全国用于农药喷洒。多数工业用无人直升机的机身全长约 4m,自重约为 60kg,药剂承载量为 10~24kg。Robocopter300 (川田工业) 机型是个例外,它搭载轻型自动飞行稳定装置 (ASE),能模仿飞行员的微妙操作,承载质量为 294kg (全部装置质量为 794kg),具有与中型有人直升机同等的承载能力^[31]。顺便提一句,在日本驾驶农林水产航空协会的认证机型实施农药喷洒是手持驾驶执照的人应尽的义务。

目前,人们正在以工业用无人直升机为基础研究自主飞行技术,自主飞行要求有姿态传感器、方位传感器、GPS 传感器等来检测机身的位置和速度等,从而进行控制。借助于无人直升机的自主飞行控制,人们得以从空中对火山禁入区域进行地形观测。例如,2000 年进行了有珠山 (位于日本北海道) 火山喷火灾害观测,投下测量砂土和泥石流厚度的标尺,2001 年完成了对三宅岛危险区域的接近观测,另外还用于针对地球观测卫星的遥测数据进行地域性详细光谱特性的观测等 (图 4.209)^[32,33]。

(2) FTB^[34] 直升机用于浮起的推力作用在重心的上方,火箭和喷气 VTOL 机与此不同,它必须进行姿态控制,以便在空气动力无法稳定的速度区域内,将姿态不稳定变得稳定。控制的方法有两种:一种方法是控制万向接头机构 (具有 2 个轴向旋转支点),改变推力对机身重心作用的方向;另一种方法



图 4.209 工业用无人直升机(雅马哈发动机)

是推力装置本身是固定的,利用 RCS(Reaction Control System)推力器的喷射调整姿态。

NASDA 于 1999 年研制的无人实验机 FTB(Flying Test Bed)(图 4.210)可以算作是一种 VTOL 机,其目的是掌握未来登月探测时在月球表面软着陆的最后阶段从月球表面垂直下降到软着陆阶段的导航控制的基本技术。FTB 的全宽为 3.46m,高度为 2.1m,全部装备质量合计 400kg(含燃料 60kg),垂直方向搭载 1 台喷气涡轮发动机,用于浮起。它先将发动机的压缩空气抽出去,然后经储气罐从阀门喷出,以代替 RCS 推力器实现姿态控制。它靠飞行控制装置、姿态检测装置、GPS 位置检测装置等实现飞行控制,根据预编程序的内容,边监视飞机的位置,边飞行。在发生意外情况时,可利用自动安全装置或来自地面的无线电信号使 FTB 的发动机停止工作,同时启动降落伞安全着陆。2000~2001 年,其进行了水平飞行和对目标地点的软着陆操纵实验。

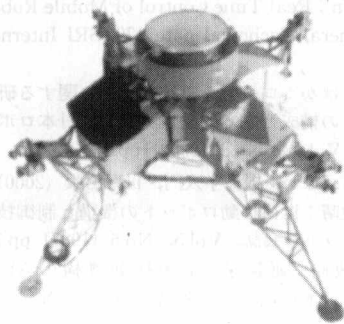


图 4.210 FTB(NASDA)

3) 浮力型

浮力型的代表是飞艇,按结构有“硬式”、“软式”、“半硬式”等几种形式,现在使用最多

的仍是靠内部气压保持船体外形的软式飞艇。软式飞艇的气包(飞艇的气球部分)内部前、后配置有姿态控制和高度控制的空气室。该空气室以外的气包称为燃气室,内充轻质气体(在日本经常使用氦气)。例如,对后部的空气室充空气,再通过燃气室对前部的空气室施加压力,达到一定压力后,通过空气阀将前部空气室内的空气向船体外释放,即可形成扬头姿态,根据需要,操作升降舵,就能够上升。送入空气室的空气或是经进气口流向螺旋桨形成后部气流,或是由压缩机减速或停止。小型飞艇的操纵有时采用水平舵、上下舵和前进后退来完成。

根据航空法的规定,无线电操纵的飞艇限制在 300m 以下(含 300m)的高度使用,例如,用做广告,或搭载扬声器进行宣传,或搭载照相机进行空中摄影等。

从 1998 年起,日本文部科学省和总务省致力于“平流层平台”的研究计划。这个计划将搭载有通信器材等的无人飞艇等滞留在高度 20km 左右的平流层中,充当空中无线电中继基地。在 2002 年,日本试制了首台自主导航的有动力无人飞艇,它的全长为 24.2m,机身直径为 6.25m,带十字尾翼和推进器,船体质量为 614kg(含内部燃气),属于软式飞艇,位于后吊篮左右的电机和螺旋桨构成推进器,可最大以 8.5m/s 的速度飞行。它接收地面信号进行遥控,但具有自动在目标位置上升、下降、停留的能力。要实现平流层平台,需要解决强紫外线照射、极低温(-56°C)、强气流(约 25m/s)以及相当于地面 1/20 (50hPa)的低气压等环境条件的技术问题。

4) 宇宙空间

在行星探测中,人们多数将行星探测器称为机器人。由此加以扩展,人造卫星似乎也可以看成是一种空中机器人。研究的第一阶段,是设法让国际空间站的航天员们即使不进行舱外活动,也能了解舱外的情况。1997 年的航天飞机 STS-087 在飞行中完成了 AERCam Sprint 实验(图 4.211)。该航天飞机搭载了一个直径为 33cm 的球,质量约 16kg,其上装有立体照相机,考虑到与其他物体可能会发生碰撞,因此选用柔软材料加以覆盖,靠内装的喷射装置,能够实现 6 个自由度的动作,也可以自动保持姿态。AERCam

拍摄的图像被传送到航天飞机的操作员和地上控制器中,靠操作员的遥控操作,它能在航天飞机周围漫游,观察航天员的作业情况^[37]。

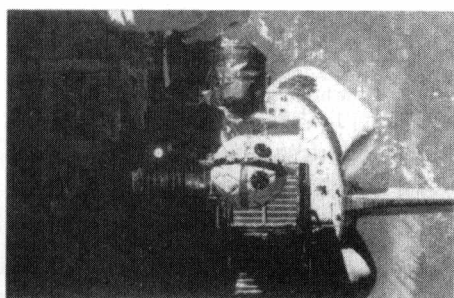


图 4.211 AERCam Sprint(NASA)

4. 今后的应用

空中机器人还可以用于应对灾害等,随着 GPS 的普及,空间位置测量和控制的环境将逐步完善,因此空中机器人今后有望有更广阔的发展领域。为此,必须注意对人员和设备安全方面的技术开发。

市川 诚

参考文献

- 4.1 车轮式移动机构
- [1] H. W. Stone : Mars Pathfinder Microover—A small, low cast, low power space craft, AIAA 96 (1996)
- [2] 津川定之 : 自動車の自動運転システム, 日本ロボット学会誌 Vol.13, No.7 (1995) pp.52 55
- [3] 無人搬送システムガイドブック, 流通研究社 (1986)
- [4] 田中孝ほか : 車両・機械と土系の力学 —テラメカニックス—, 学文社 (1993)
- [5] GP 企画センター : 建設車両の仕組みと構造, グランプリ出版 (2001)
- [6] 米田隆志ほか : 車椅子・歩行介助装置の現状と課題, 日本ロボット学会誌 Vol.11, No.5 (1993) pp.644 648
- [7] R. A. Cooper : Wheelchar Selection and Configuration, Demos Medical Publishing (1998)
- [8] 金山裕ほか : 車輪型移動ロボットのための走行モジュール, 日本ロボット学会誌 Vol.2, No.5 (1984) pp.18-32
- [9] 新井義和ほか : 群ロボット環境における局所的通信に基づく衝突回避, 日本ロボット学会誌 Vol.19, No.1 (2001) pp.45 58
- [10] 本間大ほか : 一輪不整地走行ロボットとその制御法の研究, 日本ロボット学会誌 Vol.2, No.4 (1984) pp.366 372
- [11] 自律移動ロボット“山彦”の紹介 —一輪型自律移動ロボット, <http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/>
- [12] 山藤和男ほか : 平行二輪車の姿勢制御に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, Vol.53, No.10 (1984) pp.366 372
- [13] 佐藤力ほか : ジャイロ二輪車, 計測自動制御学会論文誌, Vol.17, No.4 (1981) pp.1622 1625
- [14] 高野政晴ほか : 移動ロボット TO ROVER の開発研究, 精密機械, Vol.49, No.11 (1983) p.1572
- [15] 内田康之ほか : 車輪の凹凸地踏破性能評価と HS 車輪の開発, 日本ロボット学会誌 Vol.18, No.5 (2000) pp.743 751
- [16] 中村仁彦 : 非ホロノミックロボットシステム, (第2回) 幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5 (1993) pp.655 662
- [17] 西川晃平ほか : ホロノミック特性を有する全方向移動ロボットと移動ロボットの高精度誘導方式の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.2 (1995) pp.249 256
- [18] S. Ganapathy : Decomposition of Transformation Matrices for Robot Vision, Pro. Int. Conf. Robotics and Automation (1984) pp.130 139
- [19] 浅間一ほか : 3 自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2 (1996) pp.249 254
- [20] Swedish 社 (Sweden) : Mechanum Wheel (1975)
- [21] 広瀬茂男ほか : 大荷重効率全方向移動車輪の開発, 日本機械学会 ROBOMECH'93 講演論文集 (1992) pp.350 355
- [22] 駄本理一郎ほか : Omni Disc を用いた全方向走行車の開発, 第6回ロボティクスシンポジウム予稿集 (2001) pp.255 260
- [23] T. Arai et al. : The Control and Application of Omni-Directional Vehicle, Proceedings of 8th World Congress of IFAC, Vol.4 (1981) pp.1855 1860
- [24] 和田正義ほか : ホロノミック全方向移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8 (1997) pp.1139-1146
- [25] K. Tani et al. : Active Suspension Four-wheel Model for a Terrain Robot, IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (1989) pp.408-413
- [26] G. Agin : Real Time Control of Mobile Robot with a Camera, Technical note 179, SRI International (1979)
- [27] 遠藤玄ほか : ローラーウォーカーに関する研究—システムの構成と基本的動作実験—, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.270-277
- [28] 井原素三ほか : 機構学入門, 日新出版 (2000)
- [29] 高野政晴 : 自律移動ロボットの機構と制御技術, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5 (1987) pp.52-59
- [30] 高野政晴 : 運動学 (車輪移動機構の ABC (第3回)), 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3 (1995) pp.355-360
- [31] 機械工学便覧, 日本機械学会 (1988)
- [32] 日本運搬車両機器工業会 : ハンドトラックの設計手法, (1976)
- [33] 景山克三ほか : 自動車力学, 理工図書 (1984)
- [34] 松本治ほか : 移動ロボットの内外界センサのみによる姿勢検出とその制御, 日本ロボット学会誌, Vol.8,

- No.5 (1990) pp.541-550
- [35] 飯田重喜ほか：独立二動輪操舵型移動車の走行制御，RSJ 第8回学術講演会 (1990) pp.959-962
- [36] 小森谷清ほか：移動ロボットのためのランドマーク観測計画，日本ロボット学会誌 Vol.11, No.4 (1993) pp.535-540
- [37] 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店 (1983)
- [38] A. Gelb：Applied Optimal Estimation, MIT Press (1974)
- #### 4.2 履带式移動機構
- [1] 履帯設計指針作成委員会：履帯の設計工学—履帯設計と性能予測の基礎—，テラメカニクス研究会 (2000)
- [2] 米田完ほか：粉体の変形特性を利用したハイグリップクローラの開発，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.8 (1997) pp.92-97
- [3] GP企画センター編：建設車両の仕組みと構造，グランプリ出版 (2001)
- [4] 岩本太郎：クローラ形，日本ロボット工学ハンドブック (1990) pp.328-329
- [5] T. Iwamoto et al.：Transformable Crawler Mechanism with Adaptability to Terrain variations, '85 ICAR (1985) pp.285-291
- [6] H. Heki et al.：Crawler Driven Robotic Vehicle with Steering Mechanism for Nuclear Power Plant, Proc. Of the 30th Conference on Remote Systems Technology (1982) pp.146-149
- [7] G. W. Koehler：Typenbuch der Manipulatoren, Verlag Karl Thiemeich：Munchen (1981) pp.596-597
- [8] G. W. Koehler et al.：Manipulator Vehicles of the Nuclear Emergency Brigade in the Federal Republic of Germany, Proc. 24th Conference on Remote Systems Technology (1976) p.196
- [9] M. Devresse and L. Costa：General Concept of a Remote Multipurpose Vehicle for Nuclear Applications, '85 ICAR (1985) pp.1-5
- [10] G. Clement et al.：Mobile Robot for Hostile Environment, Proc. of Remote Systems and Robotics in Hostile Environments (1987) pp.270-277
- [11] Y. Maeda et al.：Prototype of Multifunctional Robot Vehicle, '83 ICAR (1983) pp.421-427
- [12] 守田友義ほか：ブルドーザ，産業図書 (1969)
- [13] M. G. Bekker：Theory of Land Locomotion, The University of Michigan Press (1956)
- [14] 田中ほか：車両・機械と土系の力学—テラメカニクス—，学文社 (1993)
- #### 4.3 双足移動ロボットの機構と制御
- [1] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [2] Y. Kuroki et al.：A Small Biped Entertainment Robot, Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2001) pp.181-186
- [3] K. Kaneko et al.：Design of advanced leg module for Humanoid Robotics Project of METI, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (2002) pp.38-45
- [4] 広瀬ほか：人間型ロボット，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.7 (1997) pp.983-985
- [5] 下山：竹馬形2足歩行ロボットの動的歩行，日本機械学会論文集 (C), Vol.48, No.433 (1982) pp.1445-1455
- [6] 山口ほか：路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.4 (1996) pp.546-559
- [7] J. Yamaguchi and A. Takanishi：Development of a Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (1997) pp.185-192
- [8] R. マクニール・アレクサンダー：生物と運動—バイオメカニクスの探究，日経サイエンス社 (1992)
- [9] 小谷：多足歩行ロボットの世界，日本ロボット学会誌，Vol.11, No.3 (1993) pp.379-384
- [10] 中野，大久保：跳躍ロボット全般について，日本ロボット学会誌，Vol.11, No.3 (1993) pp.342-347
- [11] 梶田，谷：線形倒立振り子モードを規範とする凹凸路面上の動的2足歩行制御，計測自動制御学会論文集，Vol.31, No.10 (1995) pp.1705-1714
- [12] 高西：上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット，日本ロボット学会誌，Vol.11, No.3 (1993) pp.348-353
- [13] M. Vukobratovic (加藤，山下訳)：歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社 (1977)
- [14] 牧田，池田，古庄，坂口：足先自由度を持つ二足歩行ロボットによる段差の昇降，第15回日本ロボット学術講演会予稿集 (1997) pp.111-118
- [15] 日本ロボット学会編：ロボット工学ハンドブック，第1刷 (1990)
- [16] 木村ほか：四足歩行ロボットの力学と制御—制御入力の冗長性を利用した動歩行—，第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1987) pp.371-372
- [17] 米田，坪内，大隈：はじめてのロボット創造設計，講談社サイエンティフィク (2001)
- [18] 高西ほか：未知の外力下における二足歩行—プログラム制御を用いた歩行実験による制御方式の検討—，第7回日本ロボット学会学術講演会 (1989) pp.35-38
- [19] 川路：二足歩行ロボットのリズムベース型運動制御，日本ロボット学会第56回講習会「2足歩行ロボット技術の現在—ヒューマノイドの基礎技術—」テキスト (1998) pp.13-32
- [20] K. Ogasawara and S. Kawaji：Generation of regular rhythm for dynamic biped locomotion, システム制御情報学会論文誌，Vol.39, No.10 (1995) pp.562-573
- [21] 加藤，村田：立体写真法による人間の歩行の解析，バイオメカニズム4，東京大学出版会 (1978) pp.168-176
- [22] 土屋和夫：歩行の分析，真島編，生体の運動機構とその制御，杏林書院 (1972)
- [23] 山下，谷口：ヒトの歩行開始動作の解析 (実験データの回帰分析とシミュレーション)，計測自動制御学会論文集，Vol.22, No.3 (1986) pp.303-309
- [24] M. Vukobratovic, A. A. Frank and D. Juričić：On the stability of biped locomotion, IEEE Bio-medical Engineering, Vol.17, No.1 (1970) pp.25-36
- [25] M. Vukobratovic and J. Stepanenko：On the sta-

- bility of anthomorphic systems, *Mathematical Biosciences*, Vol.15 (1972) pp.1-37
- [26] M. Vukobratvić (加藤, 山下訳): 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社 (1975)
- [27] H. Hemami and R. L. Farnsworth: Control postural and gait stability of a planer five link biped, *IEEE AC*, Vol.22, No.3 (1977) pp.452-458
- [28] C. Goliday and H. Hemami: An approach to analyzing biped locomotion dynamic and designing robot locomotion controls, *IEEE AC*, Vol.22, No.6 (1977) pp.963-972
- [29] 伊藤, 藤井, 伊藤: 2足歩行系のサーボモデルによる解析, *バイオメカニズム*, Vol.4 (1978) pp.263-270
- [30] T. Yamashita and A. A. Frank: A Study of Controllability of Body Motion in a Biped by a Linearized Model, *JACC (Austin, Texas)* (1974) pp.564-574
- [31] V. Larin: Control of a jumping robot (Part I, Choice of programmed trajectory), *Mechanics of Solids*, Vol.14, No.6 (1979) pp.22-27
- [32] V. Beletskii, V. Berbyuk and V. Samsonov: Parametric optimization of motions of bipedal walking robot, *Mechanics of Solids*, Vol.17, No.1 (1981) pp.24-35
- [33] M. Raibert: *Legged Robots That "Balance"*, MIT Press (1986)
- [34] F. Gubina, H. Hemami and R. McGhee: On the dynamic stability of biped locomotion, *IEEE Biomedical Engineering*, Vol.21, No.2 (1974) pp.102-108
- [35] H. Hemami and B. F. Wyman: Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in frontal plane, *IEEE AC*, Vol.24, No.4 (1979) pp.526-535
- [36] 有本, 宮崎: 二足歩行ロボットの階層制御, *日本ロボット学会誌*, Vol.1, No.3 (1983) pp.167-175
- [37] 成清, 小林, 伊藤, 細江: 二足歩行系の両脚支持期の制御について, *電気学会論文誌 (C)*, Vol.103, No.12 (1983) pp.281-286
- [38] 成清, 伊藤, 細江: 拘束条件付力学系の一解法, *計測自動制御学会論文集*, Vol.18, No.4 (1982) pp.371-376
- [39] Kato et al.: Information-power Machine with Senses and Limbs, *Proc. of CISM-IFTOMM Symposium Theory and Practice of Robots and Manipulators (Sep.1973)* pp.12-24
- [40] 高西, 石田, 山崎, 加藤: 2足歩行ロボット WL-10 RD による動歩行の実現, *日本ロボット学会誌*, Vol.3, No.4 (1985) pp.325-336
- [41] A. Takanishi et al.: A Control Method for Dynamic Biped Walking under Unknown External Force, *Proc. of IEEE Int. Workshop Intelligent Robots and Systems* (1990) pp.795-801
- [42] 李, 高西, 加藤: 上体を有する2足歩行ロボットの学習制御, *日本ロボット学会誌*, Vol.11, No.7 (1992) pp.1011-1019
- [43] 山口, 高西, 加藤: 路面形状に偏差がある環境における2足歩行制御—未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現—, *日本ロボット学会誌* Vol.13, No.7 (1995) pp.136-145
- [44] J. Yamaguchi and A. Takanishi: Development of a leg part of a humanoid robot—Design of a biped walking robot having antagonistic driven joints using a nonlinear spring mechanism—, *Advanced Robotics*, Vol.11, No.6 (1997) pp.633-652
- [45] H. O. Lim, A. Ishii and A. Takanishi: Emotion Expression of a Biped Personal Robot, *IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems* (2000) pp.191-196
- [46] H. O. Lim, Y. Yamamoto and A. Takanishi: Stabilization control for biped follow walking, *Advanced Robotics*, Vol.16, No.4 (2002) pp.361-380
- [47] T. Furuta, Y. Okumura, T. Tawara and H. Kitano: 'morph': A Small-size Humanoid Platform for Behavior Coordination Research, *Proc. of IEEE RAS Int. Conf. on Humanoid Robots* (2001) pp.165-171
- [48] 清水正晴ほか: 小型・多関節ヒューマノイドにおける全身運動制御用インテリジェントネットワークデバイスの開発, 第19回日本ロボット学会学術講演会論文集 (CD), 日本ロボット学会, 3A19 (2001-9)
- [49] T. Tawara, T. Furuta, Y. Okumura, H. Okada, and H. Kitano: Generalized ZMP Compensation—Whole Body Behaviors for Humanoid Robots, *Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots* (2001) pp.415-420
- [50] 下山: 竹馬型2足歩行ロボットの動的歩行, *日本機械学会論文集 (C)*, Vol.48, No.433 (1982) pp.1445-1454
- [51] 三浦, 下山: 竹馬型二足歩行ロボットの制御, *日本ロボット学会誌*, Vol.1, No.3 (1983) pp.176-181
- [52] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase: Localization of a high speed biped using modern control theory, *Int. J. Control*, Vol.40, No.1 (1984) pp.107-119
- [53] J. Furusho and M. Masubuchi: Control of a dynamical biped locomotion system for steady walking, *Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Mes. and Control*, Vol.108, No.2 (1986) pp.111-118
- [54] 佐野, 古荘: 角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行, *計測自動制御学会論文集*, Vol.26, No.4 (1990) pp.459-466
- [55] 川村, 川村, 藤野, 宮崎, 有本: 運動パターン学習による二足歩行ロボットの歩行実現, *日本ロボット学会誌*, Vol.3, No.3 (1985) pp.177-187
- [56] R. Kato and M. Mori: Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory, *Automatica*, Vol.20, No.4 (1984) pp.405-414
- [57] 梶田, 小林: 位置エネルギー保存軌道を規範とする動的2足歩行の制御, *計測自動制御学会論文集*, Vol.23, No.3 (1987) pp.281-287
- [58] 舟橋, 小川, 後藤, 小島: 二足歩行機械の脚機構の総合 (第1報, 足関節軌跡創成機構の総合, 第2報, 足首駆動機構の総合), *日本機械学会論文集 (C)*, Vol.50 No.455 (1984) pp.1285-1297
- [59] 山下, 山田, 猪谷: 歩行の基礎的研究, *バイオメカ*

- ニズム, 東京大学出版会 (1972) pp.226-234
- [60] 伊藤, 藤井, 伊藤: 2足歩行系のサーボモデルによる解析, バイオメカニズム, Vol.4 (1978) pp.263-270
- [61] F. Gubina, H. Hemami and R. McGhee: On the dynamic stability of biped locomotion, IEEE Biomedical Engineering, Vol.21, No.2 (1974) pp. 102-108
- [62] H. Hemami and B. F. Wyman: Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in frontal plane, IEEE AC, Vol.24, No.4 (1979) pp.526-535
- [63] F. Miyazaki and S. Arimoto: A control theoretic study on dynamic biped locomotion, Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Mes. and Control, Vol.102, No.4 (1980) pp.233-239
- [64] J. Furusho and M. Masubuchi: A Theoretically motivated reduced order model for the control of dynamic biped locomotion, Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Mes. and Control, Vol.109, No.2 (1987) pp.155-163
- [65] 細江, 武市, 熊井, 伊藤: 高ゲインフィードバックによる2足歩行の安定解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.9 (1986) pp.948-954
- #### 4.4 多足机器人的机构和控制
- [1] 東: 生物の動きの事典, 朝倉書店 (1997)
- [2] ロボット工学ハンドブック (初版), コロナ社 (1990)
- [3] 中野, 大久保: 跳躍ロボット全般について, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3 (1993) pp.342-347
- [4] M. H. Raibert: Legged Robots That Balance, The MIT Press (1986)
- [5] 米田, 坪内, 大隅: はじめてのロボット創造設計, 講談社 (2001)
- [6] R. B. McGhee and A. A. Frank: On the stability properties of quadruped creeping gaits, Mathematical Biosciences, Vol.3, No.3 (1968) pp.331-351
- [7] K. Yoneda and S. Hirose: Tumble Stability Criterion of Integrated Locomotion and Manipulation, IROS 96 Proceedings (1996) pp.870-876
- [8] Hirose, Iwasaki and Umetani: Static Stability Criterion for Walking Vehicles, 21st SICE Symposium (In Japanese) (1978) pp.253-254
- [9] E. G. Papadopoulos and D. A. Rey: A New Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators, IEEE ICR A (1996) pp.3111-3116
- [10] 広瀬, 塚越, 米田: 不整地における歩行機械の静的安定性評価基準, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8 (1998) pp.1076-1082
- [11] D. A. Messuri and C. A. Klein: Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-1, No.3 (1985) pp.132-141
- [12] A. Ghasempoor and N. Sepeshri: A Measure of Machine Stability for Moving Base Manipulators, IEEE ICR A (1995) pp.2249-2254
- [13] R. Tomovic: A general theoretical model of creeping displacement, Cybernetica, Vol.4, No. 2 (1961)
- [14] R. B. McGhee: Some finite aspects of legged locomotion, Mathematical Biosciences, Vol.2, No.1/2 (1968) pp.67-84
- [15] 米田, 広瀬: 歩行機械の転倒安定性, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.517-522
- [16] 古荘: 歩行ロボットの研究展開, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.1 (1998) pp.41-47
- [17] S. Grillner: Locomotion in Vertebrates: Central mechanisms and reflex interaction, Physiol. Review, Vol.55 (1975) pp.367-371
- [18] U. Bassler: On the definition of central pattern generator and its sensory control, Biol. Cybern., Vol.54 (1986) pp.65-69
- [19] 福岡, 木村: 4足ロボットの生物規範型不整地適応歩行, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4 (2001) pp.510-517
- [20] R. B. McGhee and A. K. Jain: Some properties of regularly realizable gait matrices, Mathematical Biosciences, Vol.13, No.1/2 (1972) pp.179-193
- [21] 広瀬, 国枝: 4足歩行機械の一般化基準脚軌道, 計測自動制御学会論文集, Vol.25, No.4 (1989) pp. 455-461
- [22] 塚越, 広瀬: 間歇クロール歩容の提案とその生成原理, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 (1999) pp.301-309
- [23] 広瀬, 米田: 4足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No. 3 (1991) pp.267-275
- [24] 広瀬, 福田, 菊池: 4足歩行機械の制御システム, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4 (1985) pp.304-323
- [25] 広瀬, 菊池, 梅谷: 4足歩行機械の基準旋回歩容, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.6 (1984) pp.545-556
- [26] 広瀬, 横井: 4足歩行機械の踏み換え歩容に関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.4 (1986) pp.364-372
- [27] 米田, 飯山, 広瀬: 4足歩行機械の間歇トロット歩容—全方向の動的制御—, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6 (1996) pp.881-886
- [28] K. Yoneda, K. Suzuki and Y. Kanayama: Gait Planning for Versatile Motion of a Six Legged Robot, IEEE ICRA (1994) pp.1338-1343
- [29] M. Vukobratovic and J. Stepanenko: On the stability of autorhythmic systems, Mathematical Biosciences, Vol.15 (1972) pp.1-37
- [30] 塚越: 傾斜面作業型4足歩行機械の機構と制御の研究, 東京工業大学博士学位論文 (1998)
- [31] 広瀬: 連結差動機構とその応用, 設計製図, Vol.21, No.10 (1986) pp.362-366
- [32] S. Hirose, H. Tsukagoshi and K. Yoneda: TITAN VII: Quadruped Walking Robot on a Steep Slope, Proceedings of the 1997 IEEE ICRA (1997) pp.494-500
- [33] 米田, 飯山, 広瀬: 4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御, Vol.12, No.7 (1994) pp.1066-1071
- [34] 塚越, 土居, 広瀬: 視覚センサを搭載した4足歩行機械による障害物の跨ぎ越え歩容, 第16回日本ロ

- ット学会学術講演会 (1998) pp.541-542
- [35] 塚越, 土居, 広瀬: 4足歩行機械による多様な傾斜面の乗り移り歩容, ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 (1999) 1 P 2-31-025
- [36] H. Tsukagoshi, S. Hirose and K. Yoneda: Maneuvering operations of the quadruped walking robot on the steep slope, *Advanced Robotics by Robotics Society of Japan*, Vol.11, No.4 (1997) pp.359-375
- [37] R. Whittaker et al.: Configuration of a Walking Robot for Volcano Exploration, *IEEE ICRA* (1993) pp.487-492
- [38] 広瀬, 米田, 塚越, 河内: ワイヤ補助装置を用いた4足歩行機械の急斜面移動, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '97(1997), 7 A 1-112
- [39] 広瀬, 梅谷: 歩行機械のエネルギー効率に関する基礎的研究, 計測自動制御学会論文集 (1979) pp.928-933
- [40] 広瀬, 梅谷: 歩行機械の脚形態と移動特性, パイオメカニズム 5, 東京大学出版会 (1980) pp.242-250
- [41] 広瀬, 米田: 実用的4足歩行機械の開発に向けて, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3 (1993) pp.360-365
- [42] S. Hirose, K. Yoneda, Arai and Ibe: Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI, *Proc. of 5th Int. Conf. Advanced Robotics* (1991) pp.723-738
- [43] 広瀬, 佐藤: 多自由度ロボットの干渉駆動, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2 (1989) pp.128-135
- [44] S. Hirose, H. Tsukagoshi and K. Yoneda: Normalized Energy Stability Margin and its Contour of Walking Vehicles on Rough Terrain, *Proceedings of the 2001 IEEE ICRA* (2001) pp.181-186
- [45] 萩原, 広瀬: 広い速度・負荷適応機構を有する新しい負荷感応型直動機構 DM X-screwの開発, 日本機械学会論文集 (C), Vol.66, No.644 (2000) pp.1258-1263
- [46] 有川, 広瀬: 3D荒地用歩行ロボットの研究, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5 (1995) pp.138-144
- [47] 広瀬, 長久保: 歩行型壁面移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5 (1992) pp.575-580
- [48] 米田, 伊藤, 太田, 広瀬: 4足歩行ロボットの省自由度構成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '00 (2000) 2 P 2-48-072
- [49] 倉爪, 米田, 広瀬: 4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3 (2001) pp.380-386
- [50] 本川: ゾウの時間ネズミの時間, 中公新書 (1992)
- [51] 木村, 秋山, 桜間: 神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8 (1998) pp.1138-1145
- [52] 尾形, 加藤, 広瀬: 多足歩行機械のための対地適応型足先機構 TAF-Soleの開発, 第18回日本ロボット学会学術講演会 (2000) 1 F 34
- [53] 安達, 小谷内, 中村, 中野: 脚に配置された力センサを用いた4脚歩行ロボットの適応歩容, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6 (1991) pp.707-717
- [54] D. E. Orin and S. Y. Oh: Control of force distribution in robotic mechanisms containing closed kinematic chains, *Trans. of the ASME J. of Dynamic systems, measurement and control*, Vol.102 (1981) pp.134-141
- [55] H. Tsukagoshi, S. Hirose and K. Yoneda: Maneuvering Operations of the Quadruped Walking Robot on the Steep Slope, *Proceedings of IROS'96* (1996) pp.863-869
- #### 4.5 形形色色的移动机构
- [1] Y. Maeda, S. Tsutani and S. Hagihara: Prototype of Multifunctional Robot Vehicle, *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robots 1985 (ICAR 1985)* pp.421-424
- [2] R. Volpe, J. Balaram T. Ohm and T. Ivlev: The Rocky 7 Mars Rover Prototype, *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 1996 (IROS 1996)* pp.4-8
- [3] T. Estier et al.: An Innovative Space Rover with Extended Climbing Abilities, *Proc. of Space and Robotics 2000*
- [4] G. Endo and S. Hirose: Study on Roller-Walker, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2000 (ICRA 2000)* pp.2808-2814
- [5] T. Omichi et al.: Development of the Multi-function Robot for the Containment Vessel of the Nuclear Plant, *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robots 1985 (ICAR 1985)* pp.371-378
- [6] 木村, 中野, 野中: 脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4 (1992) pp.520-525
- [7] 木邑, 防災ロボット移動装置, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5 (1991) pp.669-671
- [8] O. Matsumoto, S. Kajita and K. Komoriya: Structure and Locomotive Modes of a Self-contained Biped Leg-wheeled System, *Climbing and Walking Robots 2002 (CLAWAR 2002)* pp.299-306
- [9] M. Lauria, Y. Piguet and R. Siegwart: Octopus-an autonomous wheeled climbing robot, *Climbing and Walking Robots 2002 (CLAWAR 2002)* pp.315-322
- [10] A. Halme, I. Leppanen, M. Montonen and S. Ylonen: Robot motion by simultaneously wheel and leg propulsion, *Climbing and Walking Robots 2001 (CLAWAR 2001)* pp.1013-1019
- [11] 梅谷陽二, 広瀬茂男: ほふく(匍匐)運動の生物力学的研究—ほふく推進体の操縦性と制御実験—, 計測自動制御学会論文集, Vol.11, No.1 (1975) pp.20-24
- [12] 広瀬, 森嶋, 塚越, 妻木, 物部: 節体幹型ロボット KRIIの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5 (1991) pp.551-559
- [13] H. Kimura and S. Hirose: Development of Genbu: Active Wheel Passive Joint Articulated Mobile Robot, *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2002) pp.823-828
- [14] 広瀬茂男ほか: 瓦礫内推進連結クローラー走行車「蒼龍I号機」の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '98 講演論文集 (1998) 1 C1 4-1 (1) (2)
- [15] S. Hirose, T. Shirasu and E. F. Fukushima: Proposal for cooperative robot "Gunryu" composed of autonomous segments, *Robotics and Autonomous*

- Systems, Vol.17 (1996) pp.107-118
- [16] H. Adachi, T. Arai, K. Homma, Tat. Nakamura and H. Yoshinada : Study on Underground Space Excavation Machine, Proc. of the 9th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction (9th ISARC) (1992) pp.751-758
 - [17] 広瀬茂男 : 生物機械工学, 工業調査会 (1987)
 - [18] M. Mori and S. Hirose : Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 wit Agile 3D mobility, Proc. IROS (2001) pp.1552-1557
 - [19] H. Ohno and S. Hirose : Study on Slime Robot (Proposal of Slime Robot and Design of Slim Slime Robot), Proc IROS (2000) pp.2218-2223
 - [20] H. Ohno and S. Hirose : Design of Slim Slime Robot and its Gait of Locomotion, Proc. IROS (2001) pp.707-715
 - [21] 西亮 : 車輪またはクローラを用いた壁面移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5 (1992) pp.14-18
 - [22] 中村寿夫 : 無軌道式超音波探傷装置, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5 (1992) pp.45-47
 - [23] 広瀬茂男ほか : 磁気ディスク型壁面移動ロボット Disk Rover の開発, Vol.10, No.7 (1992) pp.148-153
 - [24] 内藤紳司ほか : 負荷分散クローラ機構の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5 (1987) pp.3-6
 - [25] 広瀬茂男ほか : 内部力補償型磁気吸着ユニット, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.1 (1985) pp.10-19
 - [26] 池田喜一ほか : 走査型吸盤の基礎的研究, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.3 (1988) pp.33-40
 - [27] 広瀬茂男ほか : 歩行型壁面移動ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5 (1992) pp.19-24
 - [28] 阿部琢志 : コンクリート構造物の壁面点検ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5 (1992) pp.34-37
 - [29] K. Ikeda et al. : Development of a Self-Contained Wall-Climbing Robot, Proc. of '91 Int. Symp. on Advance Robot Technology (1991) pp.365-372
 - [30] 広瀬茂男ほか : 4足壁面移動ロボット NINJA-I の開発, 日本機械学会論文集 (C), Vol.57, No.540 (1991) pp.2679-2686
 - [31] 齋藤史倫ほか : 強化学習による実ロボットの運動制御, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.1 (1995) pp.82-88
 - [32] 中西淳ほか : 解析的手法による2リンクブラキエーションロボットの制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3 (1998) pp.79-86
- #### 4.6 水下机器人
- [1] 小寺山直, 山口悟, 中村昌彦, 赤松毅人 : 海洋環境総合観測ロボット「Flying Fish」の開発研究, 日本造船学会論文集, 第179号 (1996) pp.193-204
 - [2] D. C. Summey : Hydrodynamic Design and Analysis of a Towed Environmental Sensor Vehicle, Naval Coastal System Center, NCSC-TM-280-80 (1980)
 - [3] 門馬大和, 堀田宏 : 深海曳航技術と精密測位, 第8回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1988) pp.57-62
 - [4] Y. Nagashima, T. Ishimatsu and J. T. Mian : Compact Autonomous Underwater Vehicle Using Varivec Propeller, Proc. of 1st Int. Sym. on Aqua-Bio-Mechanisms (2000) pp.321-326
- #### 4.7 空中机器人
- [1] 東昭 : 機械工学選書航空力学 (I), (II), 裳華房 (1989)
 - [2] 山名正夫, 中口博 : 飛行機設計論, 養賢堂 (1968)
 - [3] 加藤寛一郎ほか : 航空機力学入門, 東京大学出版会 (1982)
 - [4] C. D. Perkins and R. E. Hage : Airplane Performance Stability and Control, John Wiley & Sons, New York (1949)
 - [5] B. Etkin : Dynamics of Atmospheric Flight, John Wiley & Sons, New York (1972)
- [5] 浦環, 高川真一 : 海中ロボット, 成山堂 (1997) pp.67-80
 - [6] 青木太郎 : 深海巡航探査機「うらしま」の研究開発, 海洋調査技術, Vol.12, No.2 (2000) pp.63-65
 - [7] 加藤直三, 小島淳一, 加藤洋一, 松本重貴, 浅川賢一 : 海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の機体形状の最適化, 日本造船学会論文集, No.182 (1997) pp.207-215
 - [8] 小島淳一, 浅川賢一, 松本重貴, 加藤洋一, 大垣健一, 加藤直三 : 海底ケーブル調査用自律走行式水中ロボットの研究開発, 日本造船学会論文集, No.188 (2000) pp.351-358
 - [9] 青木太郎, 服部陸男 : 無人潜水機の開発, 第8回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1988) pp.89-96
 - [10] 高川真一 : 1万m級無人潜水機「かいこう」の開発について, 第13回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会 (1995) pp.1-8
 - [11] 秋園純一, 岩崎峯夫, 橋本政志, 朝倉修 : 歩行式水中ロボット「アクアロボ」の海中実用化試験, 第5回知能移動ロボットシンポジウム, 計測自動制御学会 (1990) pp.79-84
 - [12] M. Nakashima, K. Kaminaga and K. Ono : Experimental Study of Two-Joint Dolphin Robot (Propulsive Characteristics of 2nd Large Model), Proc. of 1st Int. Sym. on Aqua-Bio-Mechanisms (2000) pp.311-314
 - [13] J. M. Anderson and P. A. Kerrebrock : The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle (VCUUV) Performance Results, Proc. of 11th Int. Sym. On Unmanned, Untethered Submersible Technology (2000) AUSA, pp.360-369
 - [14] J. Ayers, C. Wilbur and C. Olcott : Lamprey Robot, Proc. of 1st Int. Sym. on Aqua-Bio-Mechanisms (2000) pp.327-332
 - [15] N. Kato : Control performance in horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.25, No.1 (2000) pp.121-129
 - [16] 加藤直三, W. ブギウイック, 鈴木佳広 : 三軸胸鰭運動装置の流力特性と自律型水中ロボットへの応用, 日本造船学会論文集, 第188号 (2000) pp.365-375
 - [17] J. Ayers, J. Witting, C. Olcott, N. McGruer and D. Masa : Lobster Robots, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms (2000) pp.277-286

- [6] I. H. Abbott and A. E. Von Doenhoff : Theory of Wing Sections, Dover (1959)
- [7] D. P. Raymer : Aircraft Design : A Conceptual Approach, AIAA (1989)
- [8] 江刺正喜 : マイクロマシン, 産業技術サービスセンター (2002) pp.231-239
- [9] W. Johnson : Helicopter Theory, Princeton Univ. Press (1980) (Also published from Dover)
- [10] 河内啓二 : ヘリコプタのダイナミクスと制御, 計測と制御, Vol.36, No.8 (1997)
- [11] S. F. Hoerner : Fluid Dynamic Drag, Hoerner Fluid Dynamics (1958)
- [12] S. F. Hoerner and H. V. Borst : Fluid Dynamic Lift, Hoerner Fluid Dynamics (1975)
- [13] R. D. Blevins : Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold (1984)
- [14] 馬場順昭, 高野博行 : 非線形形造ダイナミクスを用いた飛行制御, 日本航空宇宙学会誌, Vol.47, No.547 (1999)
- [15] McDonnell Douglas Corp. : USAF Stability and Control DATCOM (1968)
- [16] 日本航空宇宙学会 : 航空宇宙工学便覧, 丸善 (1992)
- [17] Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft, ADS-33 D (1994)
- [18] Entomopter project,
<http://avdil.gtri.gatech.edu/RCM/RCM/Entomopter/EntomopterProject.html>
- [19] 航空宇宙辞典編集委員会 : 航空宇宙辞典 増補版, 地人書館 (1995)
- [20] 日本航空技術協会編 : 航空電子入門, 日本航空技術協会 (1996)
- [21] 日本航空宇宙学会編 : 航空宇宙工学便覧, 丸善 (1992)
- [22] 全日空広報室編 : エアラインハンドブック Q&A 航空界の基礎知識, ぎょうせい (1995)
- [23] カイトプレーン (サトウ・アイ・システム) Homepage,
<http://www.satois.co.jp/product/kiteplane/index.html>
- [24] Aerosonde Homepage,
<http://www.aerosonde.com/index.php>
- [25] ERAST Project Homepage,
<http://www.dfrc.nasa.gov/Research/Erast/erast.html>
- [26] Helios,
<http://www.dfrc.nasa.gov/Newsroom/FactSheets/FS-068-DFRC.html>
- [27] 通信総合研究所プレスリリース,
<http://www2.crl.go.jp/pub/whatsnew/press/020625/>
- [28] Predator,
<http://www.ga.com/asi/home.html>
- [29] Global hawk,
http://www.iss.northropgrumman.com/products/usaf_products/global_hawk/global_hawk.html
- [30] 鈴木英夫 : 図解ヘリコプター, 講談社 (2001)
- [31] ロボコプタ 300 (川田工業 Homepage),
<http://www.kawada.co.jp/ams/robocopter/index.html>
- [32] 菅野道夫 : 実用化目指す空中ロボット—無人ヘリコプター, JRSJ Vol.18, No.7 (2000) pp.35-38
- [33] 佐藤彰 : 自律飛行無人ヘリコプタによる有珠山火口付近の観測, ヤマハ発動機技報, No.31 (2000)
- [34] 疋田澄夫他 : SELENE の月面軟着陸に向けた FTB による地上試験計画, 第 43 回宇宙科学技術連合講演会 (1999)
- [35] 田中新造 : 飛行船の雑学, グラフ社 (1983)
- [36] 成層圏プラットフォームプロジェクト,
<http://www.nal.go.jp/spf/jpn/>
- [37] AERCam Sprint Homepage,
http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er_er/html/sprint/

第 4 篇 智能技术

Robotics Handbook

第 1 章 视觉信息识别

1.1 机器人视觉

1.1.1 机器人视觉的定位

机器人视觉,是指不仅要把视觉信息作为输入,而且还要对这些信息进行处理,进而提取出有用的信息提供给机器人。

一般的视觉信息识别或者计算机视觉,就是根据识别的结果实现在实际环境中的运行。即不仅把识别结果储存和显示,同时还要对物体进行操纵,避开障碍物,进而发出警报。

机器人视觉的功能,大致可以分为以下两种:

- ① 识别环境。
- ② 理解人的意图。

过去,在车间里,机器人的视觉主要围绕检查和组装任务,即第①项功能为主。不过,今天的视觉技术已经能够识别人的手势和面部表情了,因此第②项功能,即人机界面的功能也可以实现。

1.1.2 机器人视觉的构成

图 1.1 举例说明了机器人视觉系统的主要组成部分。不过图 1.1 中省略了对 TV 摄像机的影像信号进行 A/D 变换的部分以及显示识别结果的部分。图 1.1 所示仅是系统构成的一个例子,本例中无需距离测量装置和图像处理装置。

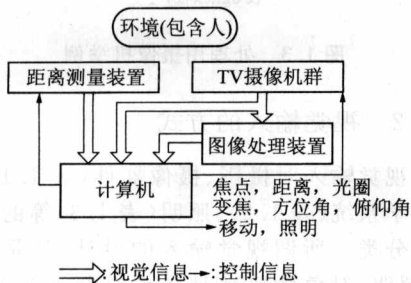


图 1.1 机器人视觉系统的构成

1. TV 摄像机群

摄像机是典型的视觉信息输入装置,它有下列几种配置情况。

① 一台摄像机。包括:普通的 TV 摄像机、HDTV 摄像机、高速摄像机等,或者是黑白、彩色、红外线摄像机。

② 用作多目视觉的摄像机。包括:立体视觉需要两台摄像机、三目视觉需要三台摄像机等。

③ 分散配置摄像机。自从摄像机变得小型和廉价后,开始允许在环境周围配置多台摄像机,从而达到摄像机的最佳组合效果。摄像机的参数,如焦距、光圈、变焦、摄像机的方向(方位角、俯仰角)等均可以由计算机程序控制。

2. 距离测量装置

把激光和红外线发射出去,它们碰到物体以后,就会产生反射光。利用对反射光方向和时间的测量,可以测定物体的距离,依据这种测距原理(称为有源方式)制作的产品已经开始在市场上销售。但是,用多目视觉测量距离通常采用多台 TV 摄像机,它不属于此列。

3. 图像处理装置

从图像中提取特征并进行高速处理,产生对应的相似图像的装置称为图像处理装置。它的硬件包括专用 LSI(Large Scale Integrated circuit,大规模集成电路)、FPGA(Field Programmable Gate Array,现场可编程门阵列)、DSP(Digital Signal Processor,数字信号处理器)等,以及它们的组合系统。

4. 计算机

机器人视觉多数都采用 PC 机。为了能达到高速处理的效果,人们往往将包含多个处理器的 PC,或者以高速网络形式连接的多个 PC 结合成组合 PC 群等。

1.1.3 机器人视觉的功能

图 1.1 构成的系统可以完成下列功能：

① 对给定大小、色彩模式等的图像和类似的图像范围进行检测,或者跟踪。

② 利用多目视觉或距离测量装置得到距离图像。

③ 利用时序图像,求图像内各个像素的运行状态(光流场)。

④ 由时序图像检测运动物体,并进行跟踪。

⑤ 根据图像处理的结果,改变摄像机的参数和方向,或者移动摄像机的整体位置,或者改善照明条件(主动视觉),以便获得更好的输入图像。

经过上述功能组合后的视觉系统,可以应用到检查、监视(对厂区内异常现象的监视或对室内外可疑人物的监视)、装配、加工、分类、移动(与地图的匹配或障碍物回避),以及对人的检查和识别等场合。

白井良明

1.2 视觉输入装置

1.2.1 视觉输入装置的构成

视觉信息的输入方法及其光学性质是决定视觉输入装置输出认知结果的类别和品质的重要因素。设计者应该根据机器人要求的视觉认识输出来决定视觉信息的输入方式。视觉输入装置可以从第 2 篇 1.3.1 节所列举的“视觉传感器”中进行选择,它的任务是提取机器人动作所必要的外界空间的信息。在光电元件的电气信号被转换成输入到机器人控制器所需的数字信号之前,中间还要经过将受光传感器的模拟信号变换成数字信号的 A/D 变换器、暂存数字数据的图像存储器以及访问图像存储器进一步处理图像的图像处理器。

对这些功能块进行不同形式的分配和安排,将得到不同的装置结构。图 1.2 给出了视觉输入装置的典型构成。常用的构成方式是把输出模拟影像信号的摄像机与模拟输入的图像处理装置组合在一起(图 1.3(a))。近年来,出现嵌入 A/D 变换器的数字输出摄像机产品,这种构成方式的优点是能保证影像在摄像机与图像处理装置之间传递时质量不至于下降。摄像机视觉输入的主要部分被内

置于摄像机本体内,使它们成为完全一体化的产品,只需经由以太网把图像处理的结果以数据的形式传送出去即可(图 1.3(b))。

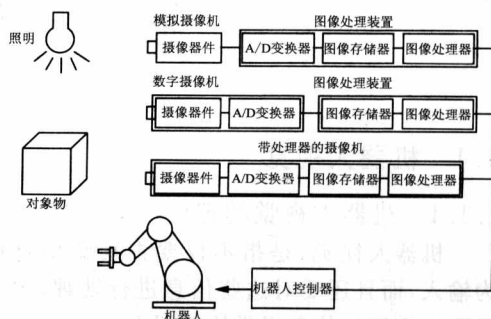
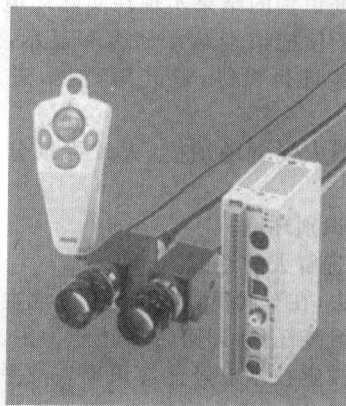


图 1.2 视觉输入装置的构成



(a) 处理器分离型
(松下电工)



(b) 处理器一体化
(Cognex社)

图 1.3 处理用摄像机举例

1.2.2 视觉输入的方式

视觉输入对摄影、摄像器件(表 1.1)、摄像光学系统(表 1.2)、照明(表 1.3)等的形态进行分类。所谓视觉输入的设计,就是对摄像、照明、对象物等各种条件进行适当组合,以满足视觉识别的输出要求,如输出物体的

三维位置、图像特征等。

续表 1.3

表 1.1 摄像器件的形式

器件/扫描	点受光传感器/二维扫描 线受光传感器/一维扫描 (物体固定+传感器移动,物体移动+传感器固定) 面受光传感器/固定
色调	西尔豪特图像(二值图像) 单色多色调(多值图像) 彩色图像(RGB图像)
RGB	单板方式(RGB镶嵌滤波器) 3板方式(RGB分解棱镜)
γ 特性	直线($\gamma=1$) 饱和特性($\gamma<1$)
扫描	顺序扫描 隔行扫描
快门控制	有触发输入 无触发输入
同步控制	非同步型 同步输入型
曝光时间控制	有高速快门功能 无快门功能

表 1.2 摄像光学系统的形式

透镜视场角	望远-标准-广角 鱼眼
主光线平行度	非远心(通常) 远心
透镜	球状透镜 圆锥透镜 双曲面透镜
焦点距离	固定焦点 变焦
滤光器	单波长滤光器 RGB滤光器 偏光滤光器

表 1.3 照明的形式

形态	点光源 线光源(扩散光源) 面光源(扩散光源) 穹顶光源(扩散光源) 平行光源(收敛光源)
形状	点光源 缝隙光源 多缝隙光源 光点图形光源 符号化图形光源
光源数	单一光源 复数光源

照明方向	落射照明 斜方照明 逆光照明(西尔豪特照明) 透过照明
波长	单谱光源(单色光镜) 白色光源 有色光源 红外线光源 紫外线光源 X射线光源 彩虹型光源
偏振光	相干光(激光光源) 非相干光(通常光)
相位	直线偏振光(p偏振光,s偏振光) 圆偏振光

1. 摄影形式

可以依据摄像机的数量、对象物与摄像机之间的几何学位置关系等特征对摄影形式进行分类。摄影方向应该选择能够最显著地呈现对象物形状特征的方向。在三角测量条件下,如果打算获得深度信息,或者想拍到单台摄像机拍摄物体时被隐藏(包藏)的部分,那么就on应该采用多台摄像机进行打拍摄。

2. 摄像器件的形式

分类摄像器件的依据是摄像器件的形状、受光器件的形状、受光量的色调、RGB色分辨率的方法、受光量与电气量之间的关系(一般表示为指数对数特性,称之为 γ 特性)、扫描方式、对瞬间现象进行摄像的快门控制、多台摄像机之间的帧同步、有无基于曝光时间控制的高速快门功能等。

尽管电视影像信号规格(NTSC规格等)的帧速率较低,但它仍然采取隔行扫描的方式,以便传送快速图像动作。隔行扫描的特点是将同一帧图像分成奇数扫描线构成的场景和偶数扫描线构成的场景分别进行传送。虽然从人眼的视觉感观来说这样做不会产生任何问题,但是由于奇数扫描和偶数扫描的采样时刻互不相同,所以会对人工动态图像分析(在后面谈到)造成一定的困难。必要时可以选择逐行扫描摄像器件,借助于单纯的光栅扫描来读取像素数据。

如图 1.4 所示,旋转台上或皮带传送带

上放置的物体,通常不用二维摄像机进行摄像,而是用一维摄像器件的线式摄像机进行流动摄像(即所谓的狭缝摄像),其效果很好。通常情况下,一维摄像器件的分辨率远远高于二维摄像器件,其读取像素的速率也非常高,因此将它与专用图像处理硬件结合起来能够制作高分辨率的实时图像处理装置。

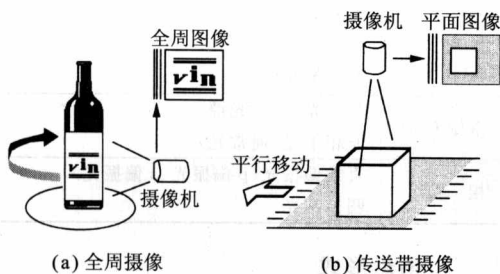


图 1.4 线式摄像机应用举例

3. 摄像光学系统的形式

摄像器件在光电变换平面上构成影像的光学系统,它可以按照下列方式进行分类:光学系统、主光线的平行度、反射光学系统、焦点系统和滤波器。如果打算拍摄机器人周围环境的全景图像,其实并不需要多台摄像机,通常采用图 1.5(a)所示的特殊光学反射系统即可。这样就可以将全周影像收容到一幅图像数据中,在经过失真修正处理后可恢复成通常的中心投影图像,然后再应用。图 1.5(b)的远心光学系统以尺寸小于透镜口径的景物为对象,在两个透镜的焦点处,设计了仅让平行光线通过的狭缝式光学系统。这种光学系统的特点是无论是物体一侧或是摄像器件一侧,主光线都是平行光线,它们对平面物体甚至立体物体进行摄影时,在对象和透镜的距离之内,任何成像都不会发生尺度的变化。因此,这个光学系统用于立体物体形状测量的效果非常好。

相应于对象的波长特性或偏振光特性进行摄像时,人们往往在透镜前设置光学滤波器。例如,为了自动检查对象物体微妙的色调变化,窄带滤波器就能起到突出图像特征的效果。另外,让偏振特性很鲜明的光照射到固体表面,p 偏振光和 s 偏振光会以不同的反射率和相位变化反射出来。利用偏振光滤

波器,可以实现上述变化的可视化,从而提取物体表面形状的缺陷。

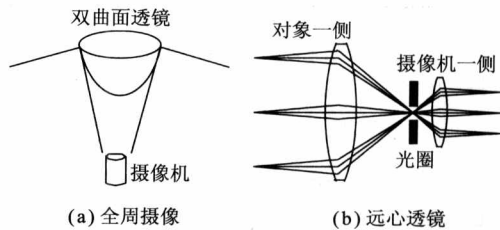


图 1.5 视觉用的特殊光学系统

4. 照明的形式

在对象物摄影图像中,照明给予图像特征品质极大的影响。照明的设定可以根据形态、形状、光源数、照明方向、波长、偏振光及相位等进行分类。对于波长、偏振光、相位而言,透镜的前置滤光镜往往成对使用。例如,为了识别条件等色(metamerism,即在特定条件下原本颜色不同的透视图看起来颜色几乎相同)的物体,往往通过将特定波长的照明和与之对应的窄带滤光镜配对使用加以鉴别。另外,由于照明方向对某些凹凸不平的对象阴影有很大影响,所以在诸如损伤检查等应用场合,斜向照明比落射照明(来自摄像方向的照明)更适合。再如,为了测量物体的外形,需要正确反映物体的轮廓,这时最好利用逆光照明得到黑像。

1.2.3 像素存取

摄像器件和图像存储器的构造不同,则图像处理器存取像素数据的方式也就不同。尽管多数视觉输入装置采用光栅扫描的方式实现像素存取,但是在表 1.4 所示的一些特殊摄像器件中,选择与图像处理内容相适应的像素存取方法也是可行的。例如,在特殊的 MOS 型摄像器件中,以数字分别输入 X、Y 的地址即可随机存取像素。另外,在原理上原本只能进行顺序扫描的 CCD 型摄像器件,如果将不需要的行和像素部分的电荷高速移出,有些器件也能实现专门针对任意行或矩形区域的高速存取。处理移动物体跟踪问题时,如果采用专门切割前一帧处理图像被关注区域附近的像素的存取方法,肯定是特别有用的。

表 1.4 摄像器件的像素存取

装 置	读出方法
CCD 型摄像器件	行读出
	任意矩形光栅读出
	帧光栅读出
MOS 型摄像器件	随机存取
行存储器	帧光栅扫描
帧存储器	随机存取

事实上,由于选通 MOS 开关的导通电阻值参差不齐,往往会导致 MOS 型摄像器件出现图像质量下降的问题,正因为如此,CCD 型摄像器件一直受到青睐。不过可以预料,MOS 型摄像器件今后会有更大的发展和进一步的普及,因为它也具有一些突出的优点。例如,随着 LSI 制造技术的改进,像素存取的灵活性将增加,与 CMOS 数字电路类似,受光部分和处理部分同样能利用硅处理技术集成到同一枚芯片上等。

1.2.4 灵巧传感器

受读出线数的限制,摄像器件一般用光栅扫描的形式向外部输出像素数据。其结果是导致读出的频带宽度远远低于受光器件的频带宽度,这在一定程度上制约了图像处理的速度。如果利用硅集成技术,让受光传感器与图像处理部分紧密地集成到同一个芯片上,构成一个灵巧图像传感器,这种措施能一举实现高速图像的输入和处理。例如,将光电二极管排成阵列,每一列配置一个 A/D 变换器和一个可编程的图像处理器,然后将行线并联起来,这就是一个二维摄像器件的灵巧图像传感器商品。Integrated Vision Products 公司的 M50 是 1536×512 像素的灵巧图像传感器,能进行 512 个 SIMD(Single Instruction Multiple Data)并行处理(图 1.6)。虽然各个通道的时钟速度较低(仅 8MHz),但是由于采用了并行作业,仍然可以高速进行边缘检测等图像处理。还因为它在构造上适合在线处理,所以它能满足光切断作业中的激光缝隙辉线位置检测,并以每秒 20 000 次的速度实现对三维轮廓的测量。再如,三菱电机开发的人造网膜传感器商品,它将受光部分电荷外移后,在相应部位改成运算功能,其结果是读出图像数据后能实现边缘检测等

简单预处理。索尼公司开发出一种采用 CMOS 器件的三维视觉传感器,它实际上是将受光部分与距离测量装置集成在一个像素内的声纳,能以每秒 30 帧的速度摄制 192×124 像素的距离图像。

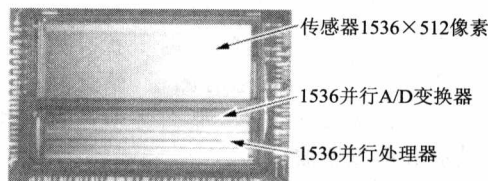


图 1.6 SIMD 型处理器中内置的灵巧图像传感器

1.2.5 特殊图像

红外线图像是特殊光学信息视觉输入的例子。红外线图像并非只检测异常发热的部位,还可以观测热分布状况,这对于安全保卫领域的应用,如检测人体运动、监视入侵者等来说是很有效的方法。

为了测量红外线,除了利用微小热电偶或热电堆(为提高灵敏度把热电偶捆扎成堆)以外,还可以用透镜把微小热敏电阻和热电元件中的红外线聚光后再送入检测。但无论采用哪一种方法,都是以点测量为基础,所以为了获得红外线图像,都不得不依赖镜像的 2 轴扫描。为此,人们期望从固体摄像器件中获取红外线的电子图像,而非借助于机械结构,但是 Si 的 pn 结光电二极管的带隙较大,仅在 $1.5\mu\text{m}$ 以下的近红外带内灵敏度较高,对接近室温的物体(放射 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的红外线)灵敏度较低,因此它不适合温度分布的图像测量。

1. PtSi 肖脱基势垒 CCD 型摄像器件

为了吸收室温范围内的红外线并对其进行光电变换,可以采用带隙比较小的 PtSi 肖脱基势垒光电二极管。它的制作工艺很简单,在完成 Si 制作工艺后,经过白金蒸发、加热处理等工序,即可像普通的可视光 CCD 型摄像器件一样应用了。

2. InSb 型混合传感器

该装置是往 InSb 半导体中注入 Be 等杂质做成 pn 结的光电二极管用于光电检测的器件。它在 $1\sim 5.5\mu\text{m}$ 的红外线带内有较高的灵敏度。它的制作工艺比较特殊,需要在

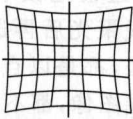
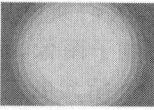
Si 制成的 CCD、CMOS 等的读出电路上堆积半球状的 In 覆盖层。

上述两种固体摄像器件在像素的一致性方面均比较差,所以后置图像处理,即暗电流补偿、灵敏度修正、噪声清除等环节均不可缺少。另外,还需要用液氮和珀耳帖元件进行冷却,以防器件自身热噪声的干扰。如果不是在用温度分布形状进行测量,而是利用摄影图像测量温度的场合,那么必须进行仔细的校验和前置斩波。

1.2.6 人为现象

摄像实践中经常会发生如表 1.5 所示的各种人为现象(图像噪声)。此外,运用单板彩色摄像机和录像机时,由于 RGB 玛塞克滤波器的色分解界限、色载波频率的 Y/C 分离误差等原因,往往会出现图像边缘色漂移等的现象。在器件制作中应该考虑上述人为现象造成的影响,如果有必要,也应该进行修正处理。

表 1.5 摄像系统中典型的人为现象

透 镜	模糊 色差 畸变	
	灰度	
受光器件	热噪声 暗电流	
扫 描	交错操作时 奇、偶扫描线之间纵向边缘偏差(抖动)	

1. 透镜系统的人为现象

透镜的厚度有限,又呈球形(非球面属于例外),所以会出现有悖理想透镜的各种人为现象。对于视觉输入来说,最不希望发生的事情是由于视野深度(焦点的聚焦深度)不够所造成影像模糊。此外,透镜的各种像差也会导致图像质量恶化。不过其中的像差畸变是可以通过事前的校正加以克服的。

所谓灰度,是指影像中心部位和周边部位亮度不一致的现象。产生这种现象的主要原因是相对于视线来说,斜穿过来的光束被透镜筒遮挡的缘故。

2. 受光器件造成的人为现象

广为应用的硅光电二极管属于固体摄像器件,它也存在一些问题,除了 pn 结的膜厚和保护膜制作工艺会对特性产生很大的影响外,热噪声和暗电流产生的麻烦也不少。常温下硅的热噪声比较严重,明暗动态范围的水平通常只有 7bit 左右。如果视觉输入采用 RGB 彩色摄像机的彩色信息,有时色彩分解的动态范围就会很差。在这种情况下,通常采用多次摄像平均化的方法来消除噪声。

3. 隔行扫描造成的人为现象

众所周知,电视摄像的信号规格采用隔行扫描。虽然它们都是由扫描线构成的一帧图像,但奇数扫描和偶数扫描的采样时刻并不相同,如果对象并非静止不动,那么扫描线每扫过一帧图像,纵向边缘就会发生一次移动,造成抖动噪声。

佐藤宏介

1.3 二维处理

1.3.1 概 述

本节讨论各种二维图像处理,它们的大致流程如图 1.7 所示。图 1.7 中的预处理指特征提取,即为后续处理创造有利条件的阶段。该阶段采用从图像到图像的变换处理。所谓特征提取,就是指从图像中检测出点列、区域和其他特征的处理,以及对这些特征量进行测量的阶段。图 1.7 中的识别处理是指对被提取的特征进行分类和识别的处理,为此需要借助于模式识别的方法。不过有关模式识别的内容会在其他章节进行介绍。

大多数情况下都可以用上述流程解释二维图像处理问题,但在实际上,预处理、特征提取、识别处理之间很难严格区分。如果是柔性识别处理,甚至不再是单一方向的处理,它包含各种反馈、假设、验证等,机制就变得复杂起来。

本书无法网罗所有相关的内容。实际上,已经出版了许多有关图像处理、识别、理解方面的专著,它们可供读者研读。

1.3.2 图像变换方法及基本的预处理

在说明常用的图像变换基本方法之前,作为预备知识,我们先来介绍图像的描述方

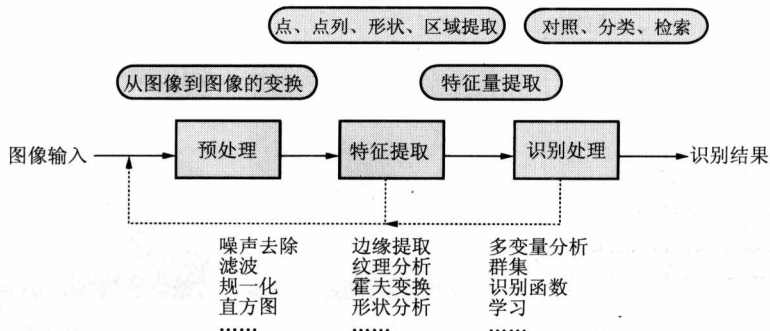


图 1.7 图像处理和识别流程

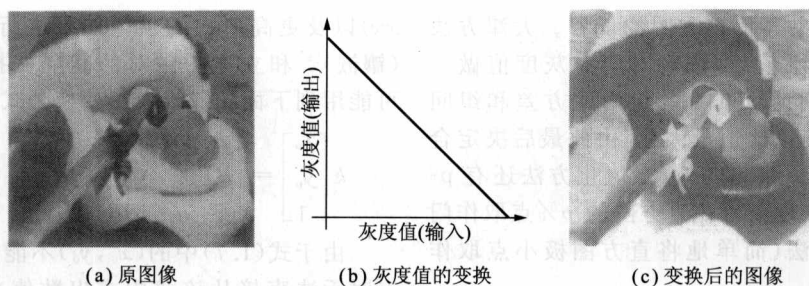


图 1.8 灰度值的变化

法。首先,下面以 $I(x, y)$ 来描述图像中各个位置 (x, y) 的灰度值(亮度值)。

在本节中,从图像到图像的变换,用下列式子表示:

$$I_o(x_o, y_o) = f(I_i(x_i, y_i)) \quad (1.1)$$

$$I_o(x_o, y_o) = f(I_{i1}(x_i, y_i), I_{i2}(x_i, y_i), \dots, I_{in}(x_i, y_i)) \quad (1.2)$$

式(1.1)表示输入和输出均为单幅图像,式(1.2)表示输入为多幅图像。

利用式(1.2)中的 f , 可以表示图像的四则运算和逻辑运算。特别是下式,或者它的绝对值,被广泛用来表示两幅图像的差分。

$$I_o(x, y) = I_{i1}(x, y) - I_{i2}(x, y) \quad (1.3)$$

这幅差分图像 I_o 成了描述两幅图像之间差异的图像,如果这两幅图像是从时序图像中提取出来的、时间彼此相邻的两幅图像,那么 I_o 还可以用于检测活动(变化)场景。

1. 灰度值的变换、直方图变换、二值化

考虑式(1.2)中的 $I_o(x, y)$ 只由输入量的灰度值 $I_i(x, y)$ 决定的情况。把输入量的灰度值看成是输出量灰度值变化的函数,例如,参照图 1.8(b),将原图像明亮部分暗化,图像就变成照片底片上那样的效果。

灰度直方图是根据图像中各个像素的灰度值绘制的频率分布图。直方图能充分地反映图像的性质。图 1.9 举出一个例子进行说明。图 1.9(a)中的(2)表示头发和胡须等雪白的部分,(1)表示除上述部分以外的黑发部分。该幅图像经直方图形状平滑(均一)处理后,各个灰度值将发生变化,成为图 1.9(b)*。这种处理方式被称为直方图均一化。均一化后对比度得到改善,在多数情况下,图像将更加适合人们观看。这种式(1.1)的函数 f 与各像素的位置 (x, y) 无关,仅与直方图有关的形式,称为直方图变换。

利用直方图变换也可以实施二值化。对直方图的低谷(图 1.9(a)中的(3))部分做门限处理,设左侧为 0,右侧为 1,则图像变成像素值只有两种取值的(0 或 1)二值图像(图 1.9(c))。如果图像中景物的灰度值可以大致分为两类,那么就能利用二值化方法把图像分离成两个部分。最典型的例子是文书图像。图 1.10(a)的 256 级灰度图像经过二值化处理后产生图 1.10(b)。此例采用大津判

* 做到严格均一化,必须将各自有别的新灰度值分摊到相同灰度值的像素上。

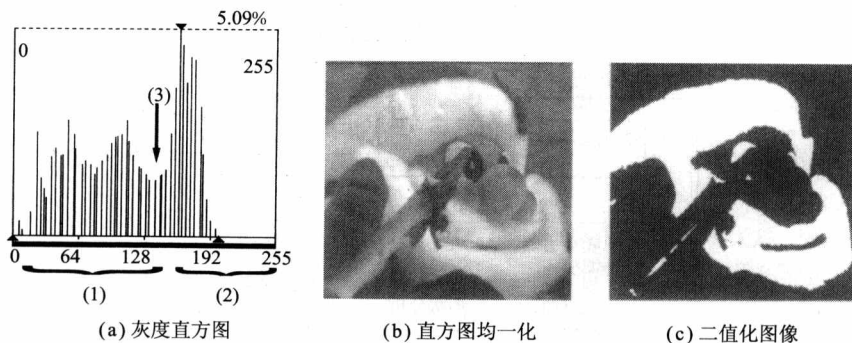


图 1.9 直方图变换

别分析法^[8]来寻找直方图的低谷。大津方法预设某个门限值后,依次对所有灰度值做二值处理,分别计算 0、1 各组内的方差和组间方差之比,使该比值最大化,由此最后决定合理的门限值。除此之外,二值化方法还有 p-泰鲁法(将灰度值累积直方图的 $p\%$ 点取作门限值)、模式法(简单地将直方图极小点取作门限值)等。

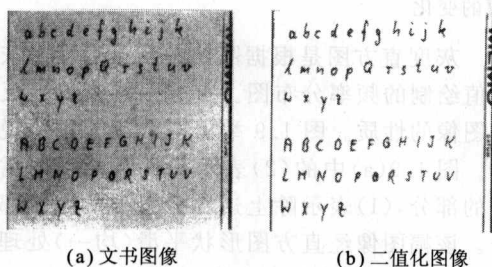


图 1.10 文书图像的二值化

2. 图像的对准和变形修正

对各种图像的变形和偏差、透镜变形、摄像机姿态变化等进行修正或补偿时,需要借助于坐标变换。

$$I_o(x_o, y_o) = I_i(x_i, y_i) \quad (1.4)$$

$$x_o = g_x(x_i, y_i), y_o = g_y(x_i, y_i) \quad (1.5)$$

让两幅以上的图像粘贴在一起,合成更大(视野更宽)的图像时也需要用到坐标变换。为此可能还会涉及几何学变换中与三维处理相关的知识,不过本书只介绍一些最基本的变换,即下述的仿射变换:

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

式(1.6)能进行旋转、扩大、缩小、偏差变换、平行移动等处理。在透镜变形修正、卫星摄像、地图拟合中有必要考虑二次项(x^2, y^2 ,

xy)以及更高阶次的项。如果进行图像粘贴(镶嵌)^[9]和立体图像对的间隔变换,那么还可能用到下面的二维投影变换公式:

$$k \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

由于式(1.7)中的 (x_o, y_o) 不能变成整数,有时无法直接从该式中求出数值来,但可以利用周围的像素值进行插值求解。具体的插值方法有最近邻法(nearest neighbor)、双线性插值法(bi-linear)、样条插值法等。最近邻法采用距 (x_o, y_o) 最近的网格结点的值,双线性插值法,如在图 1.11 所示的场合,按照下式取沿 x, y 各自方向的线性插值组合的方法:

$$I_o(x, y) = \alpha \beta I_i(x+1, y+1) + \alpha(1-\beta) I_i(x+1, y) + (1-\alpha)\beta I_i(x, y+1) + (1-\alpha)(1-\beta) I_i(x, y) \quad (1.8)$$

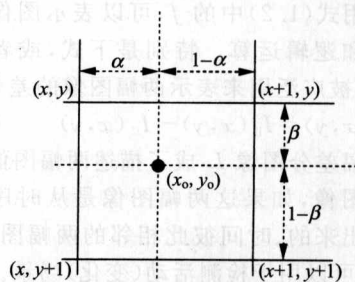


图 1.11 插值法

3. 卷积和空间滤波

有一种滤波的方法是依据下式求图像 $I(x, y)$ 与滤波器函数 $T(x, y)$ 的卷积:

$$I_o(x, y) = \int_{u_0}^{u_1} \int_{v_0}^{v_1} T(u, v) I_i(x-u, y-v) \cdot du dv$$

$$(\equiv T(x, y) * I_i(x, y)) \quad (1.9)$$

如果对象是数字图像,可以将图 1.12 所示的窗口(图 1.12 中用 B 表示)与滤波器(图 1.12 中用 A 表示)做乘法运算。计算时应该挪动窗口对整个图像进行运算。

$$I_o(x, y) = \sum_{u=0}^{u_{\max}} \sum_{v=0}^{v_{\max}} T(u, v) I_i(x+u, y+v) \quad (1.10)$$

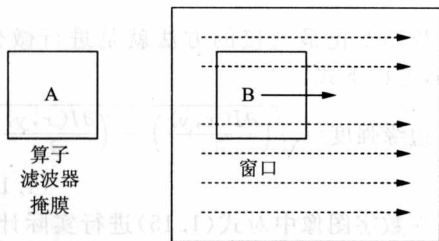


图 1.12 卷积和空间滤波

4. 傅里叶变换

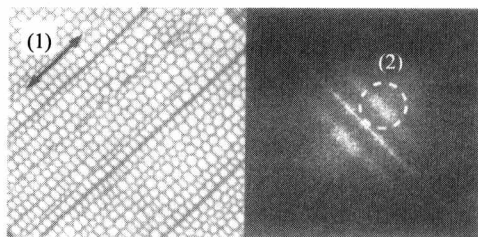
如果把图像视为二维或二维以上的信号,它就适用频率分析和各种正交变换方法。其中最常用的是傅里叶变换和小波变换(后面谈及)。所谓图像的傅里叶变换,是指在假设图像为无限连续信号的条件下求它的空间频率成分。把图像表示成 $I(x, y)$, 其傅里叶变换和傅里叶反变换可以表示为下列形式:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (1.11)$$

$$I(u, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(u, v) e^{2\pi i(ux+vy)} du dv \quad (1.12)$$

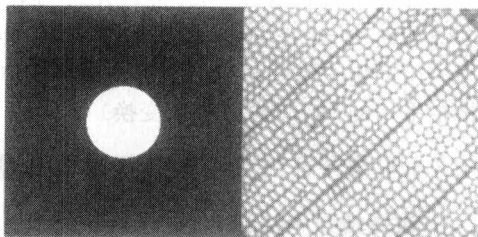
式中, $F(u, v)$ 为复数, 它的模表示空间波的振幅; $\arctan(F(u, v) \text{ 虚数部分} / F(u, v) \text{ 实数部分})$ 表示相位。如果对象是数字图像, 计算时可以将它视为离散傅里叶变换进行, 现在人们经常用 FFT (Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换) 进行变换, 它的计算速度很快。

图 1.13 给出了一个傅里叶变换的例子。图 1.13(a) 是原图像, 图 1.13(b) 取成幂图像。在图 1.13(b) 中, (2) 附近的成分变大, 这是因为细胞沿图 1.13(a) 中 (1) 的方向做往返运动的缘故。



(a) 原图像

(b) 傅里叶变换



(c) 掩膜

(d) 反变换图像

图 1.13 傅里叶变换举例

处理傅里叶变换图像只需进行空间频率的处理就可以了, 与像素的位置无关。例如, 傅里叶图像变换后, 只保留下空间频率 (u, v) 比较小的部分 (对应图 1.13(c) 的白色圆), 如果再进行傅里叶反变换, 就只剩下图 1.13(d) 中的低频成分图像。其结果是虽然图像被退色, 但杂灰色的噪声也被减弱了, 因此能收到平滑图像的效果。反之, 若只留下空间频率大的部分进行傅里叶反变换, 那么变化剧烈的部分 (如边缘部分) 会被突出, 结果会使图像变得鲜明。

5. 小波变换

傅里叶变换对平稳过程有较高的分析能力, 却很不适合对信号变化点的检测。实际上, 如果应用的目的在于检测信号的变化点, 那么小波变换更为有效。

小波变换原理可以说明如下。首先, 分别准备所在时间域和频率域的基本小波函数 $\Psi(t)$ 。小波函数由该基本小波函数按下式做 s 倍尺度变换后得到

$$\Psi_s(t) = \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{t}{s}\right) \quad (1.13)$$

要分析的信号 $f(t)$ 的小波变换 $W_s f(t)$ 定义为 $f(t)$ 与小波函数的卷积:

$$W_s f(t) = f(t) * \Psi_s(t) \quad (1.14)$$

* 如果变化只发生在一个地方, 则傅里叶变换的相位仅表示粗略的位置。

小波变换的特征如下:

① 属于所在域的波形,故发现信号的特异点(极值和变化点等)的灵敏度高。

② 改变 s , 可提取有关清晰度方面的诸多特征。

③ 在空间域和频率域均能获得良好的处理效率。甚至对高频分量可设定高的时间分辨率, 对低频分量可设定高的频率分辨率。

二维以上的图像也可以进行小波变换, 由于篇幅的关系, 这里不再进行详细说明。一个应用的例子是在摄像数据压缩的 MPEG 规格中采用的 DCT(离散余弦变换)^[10]。

1.3.3 图像特征的提取及特征量的测量

1. 边缘增强和检测

所谓“边缘”有两个含义: 一是表示“图像中发生急剧变化(且具有一定长度)的地方”; 二是表示“物体范围的边界”。图像处理和识别大都针对后者开展研究。不过, 在二维处理中, 两者很难区分, 提取前者往往可以代替后者。

典型的边缘灰度图案如图 1.14 所示, 多数处理方法都先把图案设想成阶跃边缘, 然后对其做最佳响应处理。

下面列举一些有关边缘检测的观点和方法的例子。

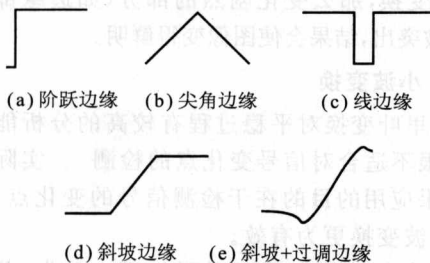


图 1.14 边缘的灰度图案

① 在事先设定边缘的二维灰度图案中, 应该将最一致的对象当作边缘。例如, Prewitt 的边缘提取法, 事先准备出与特定灰度变化对应的边缘算子, 然后把图像与边缘算子卷积结果变大的部分设定为边缘。为了适应各种不同方向的边缘, 应该如图 1.15 所示的那样准备 8 个灰度图案。还有一些方法, 需要另外准备出灰度变化的不同形式或尺度的灰度掩膜, 以便增加可检测的图案。

② 将周边陡变的像素连接起来形成

边缘。

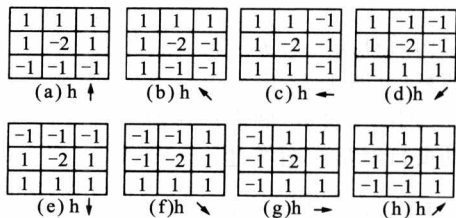


图 1.15 Prewitt 边缘算子
(箭头表示边缘的梯度方向)

检测变化最直接的方法就是进行微分, 例如, 考虑下式:

$$\text{边缘强度} = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (1.15)$$

在数字图像中对式(1.15)进行实际计算时可以采用空间滤波方法。罗伯特(Roberts)算子是最早提出的边缘提取方法之一。准备图 1.16(a)中的两种微分掩膜, 它们的输出可以用来求取边缘的强度和方向。



图 1.16 各种微分算子

图 1.16(b)中的索伯尔(Sobel)算子是著名的一阶微分算子, 可以认为它能同时进行平滑化和微分。其实, 二阶微分也广泛采用索伯尔算子。不过用于二阶微分时, 并非检测陡变(倾斜)部分, 而是检测呈现变化部分的两端。在二阶微分中, 下式的拉普拉斯算子得到广泛应用。

$$D(x, y) = \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y^2} \quad (1.16)$$

与此对应的微分掩膜如图 1.16(c)所示。

③ 所谓边缘, 就是在某个尺度, 或者某些尺度上特定的灰度变化。

从细微变化到粗略变化, 灰度图案的种类很多。观测尺度不同, 被关注部分所表现出来的特性也不同。以一维为例, 简单地说明边缘提取与尺度的关系。如下式所示, 高斯函数(G)二阶微分的微分算子既有高斯函数的平滑化作用, 又有二阶微分的作用。有人还提出一个方法^[11], 特点是用不同 σ 的高斯函数差分(difference of Gaussian)取代上述

的微分。

$$\frac{d^2 G(\sigma, x)}{dx^2} * I(x) = G(\sigma, x) * \frac{d^2 I(x)}{dx^2} \quad (1.17)$$

可以让高斯函数的均方差(σ)充当测量和特征提取的基础,即尺度。改变 σ ,会引起最显著的特征发生变化。大 σ 值对微小增减不会产生影响,但能捕捉到缓慢的明显变化;小 σ 值的情况则正好相反。Canny 提出的边缘检测法^[12]就用到上述性质,即用大尺度检测是否有边缘,再用小尺度来求解位置。由此可知,与单纯边缘提取法相比,这种方法具有良好的性质,例如,抗噪声强,甚至能提取带有少许间断的边缘等。

2. 霍夫变换(Hough transform)

为了提取几何学性质和形状已知的图案,可以采用参数空间的投票方法。例如,用 $y=ax+b$ 表示二维平面上与 y 轴不相交的直线,表示该直线的参数可以设想为以 a, b 为轴的参数空间(ab -平面)中的一个点。在这里,通过某一点 (x_0, y_0) 得到的直线的参数 (a, b) ,对应于某一条直线上的点,如图 1.17(a)所示。虽然候选点有无数个,但其参数取值限于一定的范围,把这些参数值量化,实际上是将有限的候选点 (a_i, b_i) 集合起来。于是,可以对每一个候选点都投上 1 票。设希望提取的图案是直线,如果还有一个点 (x_1, y_1) ,那么原则上通过两个点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ 可以决定一条直线。也就是说,只有对应参数 (a_0, b_0)

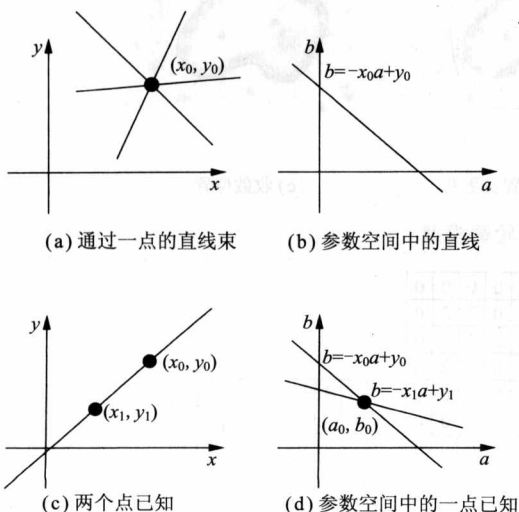


图 1.17 霍夫变换

的点接受两票投票,剩余点的投票值就是 1 票或 0 票。实际上,图像中有时有多条线段,受噪声影响往往得到多个边缘点的检测结果,所以要向尽可能多的点投票,然后挑出得票最多的参数组。

同样的情况也可能发生在圆形或其他形状上,不过由于需要的参数增多,计算时间和存储容量将以指数函数增加,所以应该设法尽量减少自由度。近年来,还有人在从事形状自由度和参数空间任意组合的霍夫变换的研究。例如,处理任意形状的所谓广义霍夫变换^[13]法和 geometric hashing^[14,15]法。

3. 区域分割

所谓区域分割,就是把性质相近(例如,灰度相近等)的邻近像素汇集成一个集合(区域),图 1.18 表示可将整个图像分割成若干个区域。如果能把同一个识别对象中相似性很高的像素归并到一个区域里,会为后续处理提供很大的便利。很早以前,人们就提出了各种区域分割的方案,其中应用比较广泛的有区域合并法,它定义了“像素彼此相似标准”,并将相似的像素(或小区域)合并成大区域;还有区域分割法,它定义了“均一区域标准”,将不满足标准要求的区域加以分割;再有,将均一区域融合的 split-and-merge 法等。在这些方法中,被广泛取作标准的特性有图像的灰度(色调)、纹理特征、边缘特征/灰度梯度等,但是“相似标准”和“均一区域标准”随图像的不同而适用性各异,需要一一进行判定。

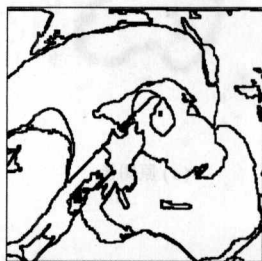


图 1.18 区域分割结果(绘出区域的边界)

4. 动态轮廓模型(snakes)

在 snakes^[16]中设置一个如图 1.19(b)所示的临时封闭轮廓,让它不断进行变形和移动,同时反复计算,求出“最佳”位置和形状,理想的状况是临时封闭轮廓紧贴物体轮廓收敛,如图 1.19(c)所示。

实际上,上面提及的“最佳”一词可以有不同的解释。例如,灰度梯度与轮廓法线方向的一致(边缘最佳),曲率或它的微分值既小又平滑(曲率最佳),具有适当的虚拟膨胀力,在封闭轮廓受到挤压时不产生收缩(大小最佳)等。与仅仅从梯度等角度选择边缘点的方法相比,该方法的优点是能巧妙地发挥封闭曲线的性质,一般不出现非稳定的结果。上述在直接选择的标准中补充约束条件,然后求解稳定结果的方法,被称为正则化^[17]。在不连续数据的三维形状复原以及其他场合能见到这种方法的应用。

5. 二值图像(区域)的处理

如图 1.20(b)所示,区域标记是将二值图像中彼此相连接的像素定义为相同号码,不同区域定义为不同号码的方法。那么依据什么标准来判断像素之间彼此“连接”呢?图 1.20(c)和 1.20(d)给出两种标准,即 4 邻接和 8 邻接,选取标准不同,结果当然也不一样。

所谓距离变换,是指针对连接区域内的各个像素求解到达边界(或外部)的最短距离,并将之设为各个像素的值,图 1.21 对此举例进行了说明。具有极大值的像素的集合被称为区域的骨架,它是粗略描述区域的特征之一。骨架的一个重要性质是从它可以复

原出原区域的面貌。

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	1	1	0
0	1	2	2	2	1	2	1	0
0	1	2	3	2	1	2	1	0
0	0	1	2	1	0	1	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

距离变换图像

图 1.21 距离变换

所谓细线化是把一定宽度的区域细分,提取粗度为 1 的细线的方法,如图 1.22 所示。该方法与骨架提取方法有相似之处,但它必须具备两个前提条件:一是应该保存区域的拓扑结构特性;二是不能恢复原区域也无妨。应该指出的是,细线化也有种种不同的算法。

区域收缩和区域膨胀被用来消除区域内微小(细小)的突起,掩埋间断或微小洞穴。区域膨胀如图 1.23(b)所示,它把区域和毗邻背景中的边界像素重新提取出来进行处理。区域收缩如图 1.23(c)所示,它针对与背景相接的边界上的像素做削减处理,把距离变换中赋值为 1 的部分剔除,如果把背景看作对象区域,它就相当于区域膨胀。区域膨胀和区域收缩组合起来实施,例如, n 次膨胀后再进行 n 次收缩,宽度小于 $2n$ 的间断和洞穴就会被修复。

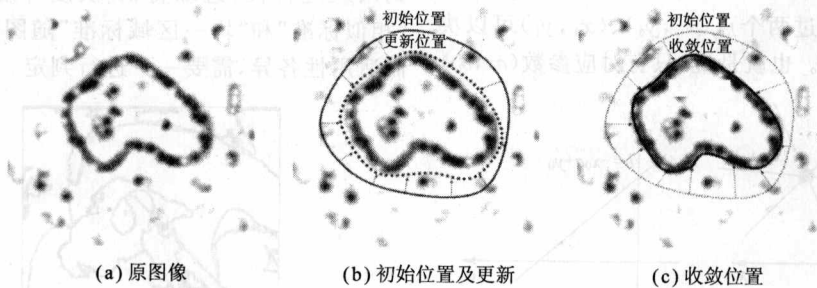


图 1.19 动态轮廓模型

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	1	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	2	2	0
0	1	1	1	0	2	2	2	0
0	0	1	0	0	0	2	2	0
0	0	1	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	3	0	2	0	0
0	0	0	0	3	0	0	0	0

0	4	0
4		4
0	4	0

8	8	8
8		8
8	8	8

(a) 原图像(二值图像)

(b) 标记结果

(c) 4邻接

(d) 8邻接

图 1.20 区域的标记

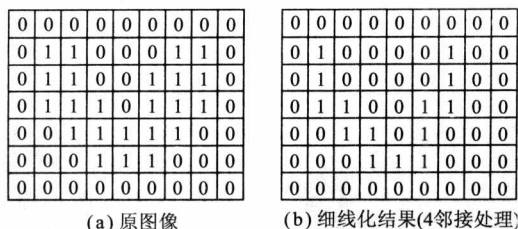


图 1.22 细化

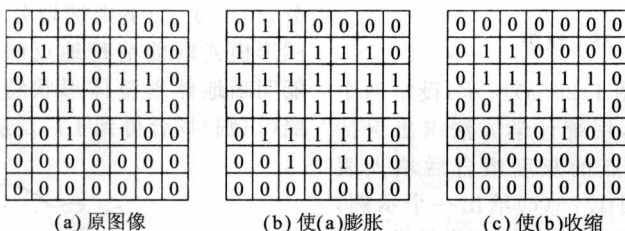


图 1.23 区域的膨胀和收缩

6. 区域的特征

有许多量可以表示被提取区域的特征(属性),这里只对几个典型的特征量作介绍。

区域的矩用下式计算:

$$m_{pq} = \iint w(x, y) x^p y^q dx dy \quad (1.18)$$

式中,如果该区域被对象区域所包含,那么则 $w(x, y) = 1$, 否则 $w(x, y) = 0$ 。由于区域部分只能取1,背景则为0,所以它是一幅二值图像。从矩的特征可以反映图形的某些基本特性。例如, m_{00} 表示面积、 (m_{01}, m_{10}) 表示重心。若区域的重心与原点重合,那么图形惯性主轴的方向 θ 可以由 $\tan 2\theta = 2m_{11} / (m_{20} + m_{02})$ 得到。

设区域周长为 L 、面积为 S , 此时若 $A = 4\pi S / L^2$ 成立,则称 A 为圆形度。圆形度是区域轮廓接近于圆形的一种度量。圆形度的值始终小于1,该值越接近1表示区域轮廓越接近于圆形。轮廓越扁平,值就越小。但是,轮廓细微的凹凸也会使圆形度值变小,甚至无法把它与整体形状扁平的情况(圆形度值也小)加以区分。

7. 点列和轮廓线形状的特征

长期以来,循环码一直被用来描述点列和轮廓线情况。例如,当巡查点列时,从微观上看,下一点是从图 1.24(a)8个方向中的一个开始的,它们的方向与顺序是一致的。

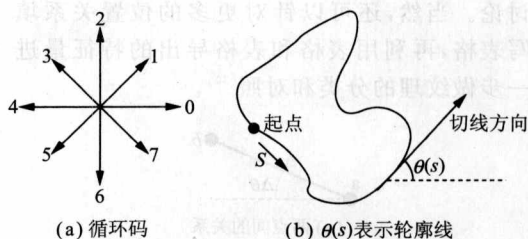


图 1.24 点列的表示方法

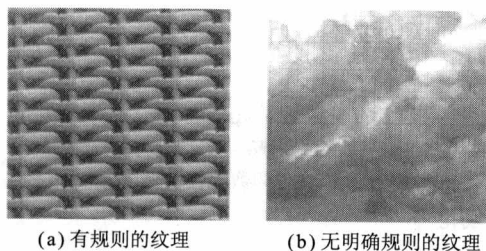
如果采用图 1.24(b)所示的自然坐标系,那么轮廓线形状可以表示成一维信号,即表示为从起点开始沿切线方向路径的函数。如果点列变成封闭曲线,那么这个一维信号可以作为周期函数来处理,于是可以用傅里叶描述符(傅里叶级数展开)^[19] 进行分析。点列和轮廓线形状特征描述还可举出其他方法,例如,下面介绍的尺度空间法,它能求算各种清晰度的特异点,从它们出现(消失)的模式中提取形状特征来比对形状。

8. 纹理的特征

纹理就是图像中的图样。例如,图 1.25(a)是特定元素按照一定规律重复得到的纹理,图 1.25(b)则是特定元素按照某个统计学性质(无明确规则)形成的复杂纹理。

识别和分离纹理可以借助于统计学方法、微观求解单位元素及其重复规则的方法或其他方法。典型的统计学方法又可以列举矩阵生成法、空间频率分量分类识别法、滤波器组法、马尔可夫场灰度生成机理近似法^[21]、

分位点搜寻法等。



(a) 有规则的纹理

(b) 无明确规则的纹理

图 1.25 纹理

矩阵生成法如图 1.26(a)所示,设定两个点之间的位置关系,用统计学方法求出保持该位置关系的两个点的灰度组合后填入表格。图 1.26(b)和图 1.26(c)给出一个示例,为了方便起见,这两个表将灰度值量化为 4 级,而且 a 、 b 的位置关系只针对两种情况进行讨论。当然,还可以针对更多的位置关系填写表格,再利用表格和表格导出的特征量进一步做纹理的分类和对照^[20]。

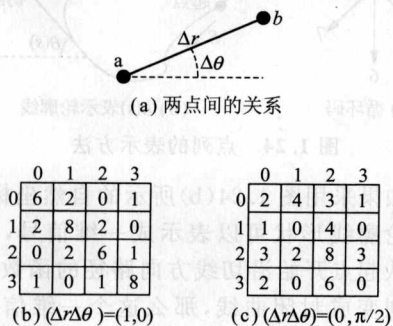


图 1.26 同时产生行和列

近年来,滤波器组法得到广泛应用。该方法事先准备多个清晰度和方向选择性不同的滤波器(滤波器组),接下来或者综合应用各个滤波器在纹理方面的输出,或者借助于人类纹理觉察模型来进行识别。至于滤波器,它们多数都采用伽柏函数,也有人正在尝试用小波变换系统地构建滤波器。

9. 尺度空间(scale-space)法和粗精(Coarse-to-Fine)战略

高斯函数叠加到一维信号上后,由于它的均方差(下面记为 σ)增大,获得了奇异点(极值)数单调减小的良好特性。这是广泛应用的尺度空间法(scale-space 法)^[22,23]的依据。该方法通过改变 σ 来求解信号导数(微分值)

的极值或穿越零点的位置,从而根据尺度变化研究信号的行为。图 1.27 中列举了尺度空间法在轮廓线形状分析方面的应用。图 1.27 中各个奇异点对应着不同尺度中轮廓线的拐点,因此改变尺度即可追踪奇异点,得到图 1.27(b)的图形模式。例如,图 1.27(b)中虚线(1)、(2)标注的部分,分别表示了凹凸凹、凸凹凸的变化,在尺度(1)下显现出凸部分,在尺度(2)下则被划分为三个部分。这个图形模式既能清楚地反映局部形状特征,又能明晰地体现整体形状特征,因此在图形对照(识别)场合得到了广泛应用。

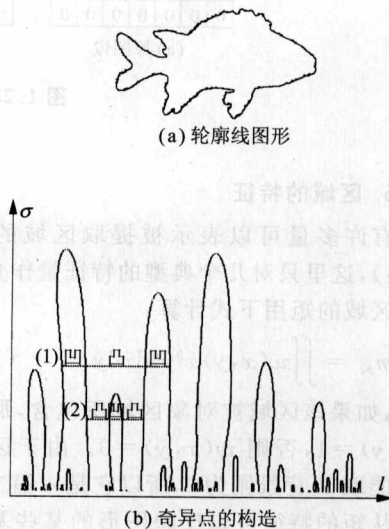


图 1.27 尺度空间法

尺度空间法对一维信号很有效,但是在二维信号处理方面不大成功,原因在于该方法无法保证二维以上信号奇异点的单调性,所以尽管人们进行了多次尝试,其应用却仍然有限。

尺度空间法实际上是借助于尺度的改变,从各个方面来挖掘对象的特征,所以一般又被称为多重清晰度分析法。其中,应用最广泛的方法是如图 1.28 所示的金字塔式图像构成法。该方法通过多级缩小,得到一组清晰度各异的图像。对于这样的图像组,在各自的层级上分别进行处理,然后再将结果进行综合,就可以将复杂问题简单化,提高处理的效率。粗精战略(Coarse-to-Fine)法的原理与此基本相同,都是靠粗一级的清晰度掌握概况,再靠精一级的清晰度开展详细分析。

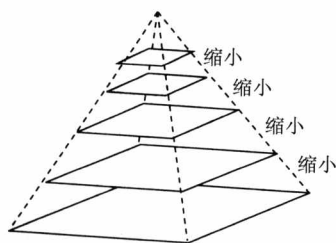


图 1.28 多重清晰度分析法

10. 模版匹配与相关

所谓模版匹配,就是把已知模式的模版与输入图像重叠,通过彼此差异的计算来检查识别对象是否存在。与空间滤波相同,该方法也是边把窗口挪动一个有限尺寸,边计算它与模版之间的差异。一般来说,只要根据 (x_0, y_0) 的变化,按照下面的公式计算模版 $T(u, v)$ 和图像 $I(x, y)$ 的差值即可:

$$\sum_u \sum_v |T(u, v) - I(x_0 + u, y_0 + v)| \quad (1.19)$$

迄今为止,上述计算公式一直得到广泛的采用,称为 SAD(Sum of Absolute Difference, 绝对误差和)。不过它也有不足之处,即对整体亮度的变化不敏感。因此,下列相关函数应用得更为广泛:

$$\frac{\sum_u \sum_v (T(u, v) - \mu_T)(I(x_0 + u, y_0 + v) - \mu_I)}{\sqrt{\sum_u \sum_v (T(u, v) - \mu_T)^2} \sqrt{\sum_u \sum_v (I(x_0 + u, y_0 + v) - \mu_I)^2}} \quad (1.20)$$

式中, μ_T 为 $T(u, v)$ 的平均值; μ_I 为以 (x_0, y_0) 为起点的窗口中 $I(x, y)$ 的平均值。因为边挪动窗口边计算整个图像通常会造成较大的浪费,所以有些人提出了改进的方法,例如,其中一种改进方法是先粗略地计算,然后挑出数值较佳的部分再做精细的检查;另一种改进方法是发现适当条件已经满足后就中断计算。

中村裕一

1.4 多维图像处理

机器人在三维现实空间中活动,而且由于自身作业和移动,或者受到其他外在原因的影响,它的形态时时刻刻都在发生着变化。与之相反,典型图像信息输入装置(以 TV 摄像机为代表)所获得的信息本质上是二维的,缺少现实世界原本带有的深度信息。因此,补充深度方向的信息,恢复三维信息的技术,甚至补充包括时间轴的四维信息处理技术,实属必要。这些技术被称为多维图像处理。

在机器人被要求具备高度智能时,如识别自身周围环境,适应环境变化等的场合,多维图像处理技术是不可或缺的。

1.4.1 立体视觉

1. 立体视觉的原理和双极约束

立体视觉(stereo vision)是从图像中获得三维信息的一项最基本的技术。在图 1.29 中设两台摄像机的摄像中心分别为 O, O' , 对三维空间内的点 P 进行观测。再设点 P 在左、右图像中的像分别为 p, p' 。如果能判明 p 和 p' 属于场景内同一个点 P 的像,那么从视线 Op 和 $O'p'$ 的交点即可求出点 P 的三维位置。由此可知,立体视觉就是由左、右图像点 $p \leftrightarrow p'$ 的对应关系复原场景三维信息的技术。为了计算出这个交点,必须已知两台摄像机之间的几何关系(相对位置和姿态)。

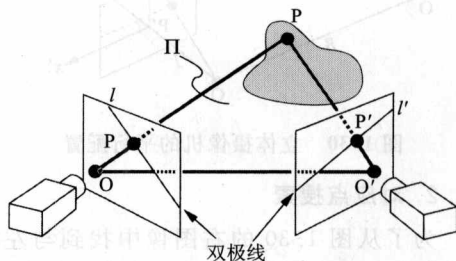


图 1.29 立体视觉的原理

在立体视觉中,最大的课题是如何由给定的图像找出对应点。为此,可以利用下列几何学的约束条件。如图 1.29 所示,考虑由 O, O', P 三个点定义的平面 Π , 设 Π 与两台摄像机投影面的交线分别为 l 和 l' 。显然, p 和 p' 分别位于 l 和 l' 上。因此,为了从右图像寻找 p 点的对应点 p' , 只要在 O, O', P 三个点构成的平面 Π 与右摄像机投影面的交线 l' 上搜索就可以了, 搜索范围限定从整个二维图像到一维直线上。这样,与直线 l 上的点 p 对应的点 p' 一定存在于直线 l' 上,称之为双极约束(epipolar constraint), Π 被称为双极面(epipolar plane), 而 l 和 l' 被称为双极线(epipolar line)。

我们来考虑图 1.30 所示的特例。图 1.30 中的两台摄像机有相同的焦距 f , 彼此平行配置, 相隔间距 B 。即使摄像机的实际配置与此不同, 仍然可以等效地实现这种配置^[1], 因为可以借助于摄像机参数来改变(rectifica-

tion)图像。在这种配置条件下,设三维空间中点P的像 p 、 p' 的坐标分别为 (x, y) 、 (x', y') ,可以得到

$$y = y' \quad (1.21)$$

因为双极线与图像的水平扫描线一致,所以其对应的搜索处理会比较简单。此外,P的景深(depth) Z 可以将视差(disparity) $d \equiv x - x'$ (它是 p 和 p' 的 x 坐标之差)代入下列式中计算得到:

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (1.22)$$

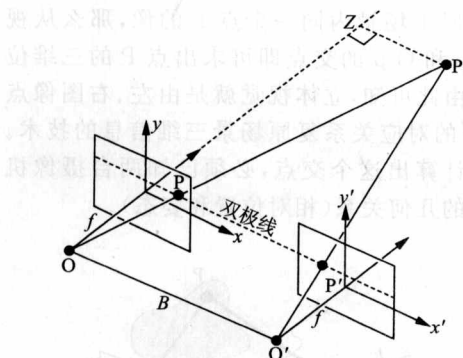


图 1.30 立体摄像机的平行配置

2. 对应点搜索

为了从图 1.30 的右图像中找到与左图像中点 p 相对应的点 p' ,需要在双极线 l' 上搜索与 p 点类似的点。为此,最简单的方法如图 1.31 所示,在与 p 对应的候选点 p' 的周围,设置一个矩形窗口,计算窗口之间的局部相似度,并选择最相似的点 p' 。

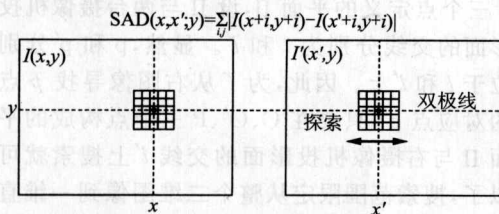


图 1.31 基于窗口匹配的对应搜索

评价相似度的尺度可以采用窗口内像素亮度差的绝对误差和(SAD; Sum of Absolute Difference)、亮度差的平方和(SSD; Sum of Squared Difference)、正规化互相关(normalized cross correlation)等。

然而,上述仅依赖于图像局部信息的方法,往往会出现同一条双极线上出现多个类

似灰度模式的现象,以至于真正的对应点未必能呈现最高的相似度,甚至会出现无法找到自身对应点的情况。因为在景深非连续变化处(如对象物体边界),有一些点一台摄像机能看到,另一台摄像机却可能看不到(隐藏,occlusion)。为了克服这些缺点,必须从更广的角度来处理问题,即既考虑对应问题,又关注周边的匹配性,而非单单针对每个像素点独立地求算对应关系,具体方法如下。

粗精分析(coarse-to-fine analysis)法先对原图像进行二次抽样得到低清晰度图像(粗略的对应),然后有步骤地提高清晰度,再进行精细匹配。在低清晰阶段,视野范围比原图像相对广阔,虽然视差的估计精度较差,却容易得到稳定的结果。经过低清晰阶段锁定的搜索范围后,再开展高清晰度匹配,这样就能保持稳定性又能提高精度了。

为了满足在大范围内的最佳性和匹配性,还频繁地使用优化的方法,即对图像整体定义一些评价函数,求解它们的最小值或最大值。图 1.30 中有两台并列的立体摄像机,如果把满足双极约束的左、右图像点 (x, y) 和 (x', y') 的对应关系写成 $\xi = \{x, x'\}$,则某条双极线上的对应序列 $(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots)$ 便描绘了一条轨迹,该轨迹在搜索平面(以 x 和 x' 分别作为横轴和纵轴)内形成路径(path)(图 1.32)。定义下式的评价函数 J ,在所有路径中寻求使下面的评价函数最小化条件的解:

$$J(\text{path}) \equiv \sum_{i \in \text{path}} (W(\xi_i) + D(\xi_{i-1}, \xi_i)) \rightarrow \min \quad (1.23)$$

式中, $W(\xi_i)$ 为点对应关系 $\xi_i = \{x_i, x'_i\}$ 的匹配代价,除了窗口内的 SAD 和 SSD 以外,还可以根据 Bayes 估计理论导出匹配对数概率密度^[8]等。 $D(\xi_{i-1}, \xi_i)$ 是毗连点对应的 ξ_{i-1} 与 ξ_i 之间的视差不连续代价,视差的变化 $|d_i - d_{i-1}|$ 越大,追加的补偿越多。

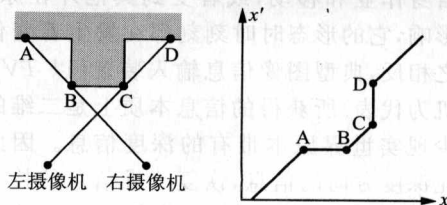


图 1.32 隐藏部分及对应的路径

如图 1.32 所示,左摄像机可以观察到,而右摄像机看不到的隐藏部分,表示为路径的水平部分。反之,右摄像机可以观察到,而左摄像机看不到的隐藏部分,属于路径的垂直部分。对应的顺序在左、右图像中不发生反转,即对于任意两组对应关系 $\xi_i = \{x_i, x_i'\}$ 和 $\xi_j = \{x_j, x_j'\}$,如果规定 $x_i < x_j$,则顺序约束(ordering constraint) $x_i' < x_j'$,则不论将路径向 x 轴或是向 x' 轴进行投影,因为保持了单调性,所以借助于动态规划法(DP: Dynamic Programming)^[31]能够有效地求解式(1.23)的最优化问题^[4,8,10,23]。但是,在图 1.33 所示的场合,如果有微小物体在背景前面浮动,那么这种约束关系就未必成立了。

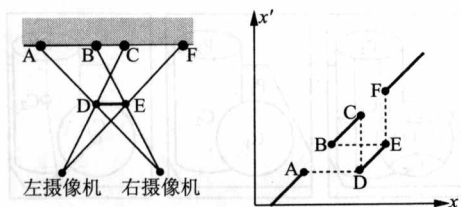


图 1.33 对应顺序反转的例子

针对各条双极线独立地求解路径的场合,由于上述方法未考虑到双极线跨接点对毗连点之间视差连续性的影响,视差图上沿双极线可能出现筋状(artifact)。这时应依据此前处理的双极线上的对应结果,对后续双极线上的处理进行控制^[8],并利用后处理对视差进行修正^[4],但是无论如何,图像整体将丧失最优性。

3. 多基线立体视觉

有另一种方法可以用来减小对应搜索的模糊性,它基于多基线立体视觉(multi-baseline stereo)^[24],需要三台以上的摄像机。例如,图 1.34 的系统中配置了一台基准摄像机和多台参照摄像机,于是基准摄像机与各个参照摄像机之间构成两组以上的摄像机对。该方法要求计算每一对摄像机对应的候选点的相似性评价价值(如果采用 SAD 或 SSD,则其值越小,对应关系越精确)。

由式(1.22)可知,视差 d 被摄像机的间距 B 除得的结果与景深 Z 的倒数成正比。因此,即使 B 与摄像机对不同,如果将评价价值表示成 d/B 的函数,那么任何一对评价价值都会

在同一个 d/B 值(代表真实景深)处形成谷底。因此,将所有摄像机对的评价价值的下部聚集起来,就会形成更为显著的深谷,结果对应的模糊度就得到了缓解(图 1.35)。

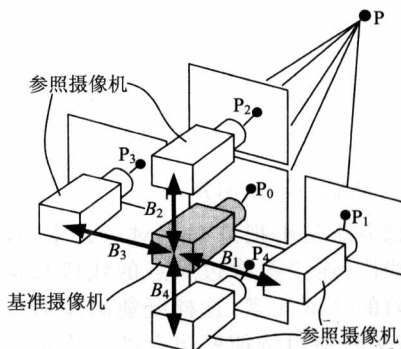


图 1.34 多基线立体视觉

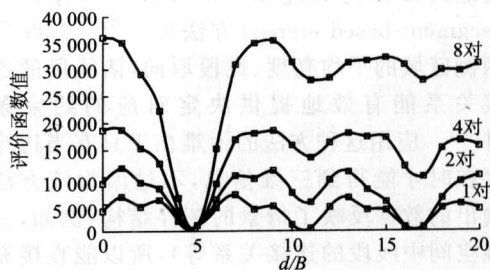


图 1.35 摄像机对数对相似性评价价值的影响^[24]

上述方法处理起来十分简单,所以便于硬件化,目前正在开发以视频码率输出距离图像的专用装置^[16]。

4. 双极面图像分析

在双极面图像分析(epipolar-plane image analysis)^[5]中有一种方法,通过连续地移动摄像机能很方便地确定对应关系。如图 1.36 所示,让摄像机沿图像的 x 轴平行且等间隔地移动,将同步拍摄到的图像累积起来构成三维图像。如果用垂直于 y 轴的平面截断该三维图像,则场景点 P 的像就在断面中描绘出一条直线来。因此,对应于搜索可以归结为从该断面图像中检测直线,并进行 Hough 变换的二维图像处理办法。设从初始位置起摄像机的移动量为 B ,特征点像 x 坐标的变分(视差)为 d ,根据式(1.22)可知,点 P 的景深 Z 可以由直线斜率 B/d 计算。该方法的缺点在于测量需要花费较长的时间,因此不大适合运动场景。

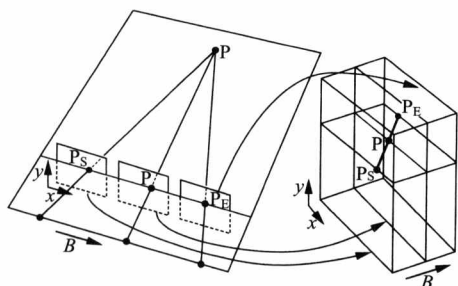


图 1.36 移动摄像机平行的双极面图像分析

5. 高阶特征的利用

该方法是不把点视为对应元素,代之以边缘线段(连接图像边缘点的线段)、锥面等更高阶的特征元素,这样既能减少对应的候选数,又能利用特征所包含的丰富信息来减弱模糊性,顺利地实现对应搜索。例如,在把边缘线段作为对应元素的线段基立体视觉(segment-based stereo)方法中^[1,14,22,28],线段两侧区域的平均亮度、线段取向,诸线段的连接关系能有效地提供决定对应的约束条件^[32]。应用这种方法的困难在于只有当边缘存在时才能得到三维信息,不过因为该方法输出的数据反映了情景的拓扑结构(例如,三维空间中线段的连接关系等),所以能直接充当物体识别的高阶任务输入量,这是它的一个突出的优点。

1.4.2 距离图像处理

在多数情况下,立体视觉系统和测距器输出的三维信息既未被结构化,数据量又很大,因此通常不适合直接用来识别或构建模型。本节将讲述距离图像处理,以便将这些信息变换成各种各样的形式,进而提取出有用的信息。

1. 分段和曲面的分类

执行识别这样的高级任务时,要求将获得的三维信息进行分段,并用场景来描述被分割区域之间的关系。具体的方法有区域法——首先从微小的初始区域开始,然后将邻近相似的区域逐个综合起来(与处理灰度图像基本相同);分割法——从数据整体开始,尽可能进行分割;以及 split-and-merge 法——上述两种方法的混合运用。

图 1.37 举出区域法的例子^[25]。首先针对测距器输出的距离图像的各个点,将邻近

的点分组,把各组视为微小平面(面积元素),建立平面方程式(图 1.37(b)),然后将邻近面积元素中的平面方程式彼此类似的部分合并成小区域(图 1.37(c)),并区分出平面和曲面两类。最后,对毗连的曲面进行平滑连续处理,使其整体上与二次曲面匹配(图 1.37(e)),于是可以将整个场景描述为区域之间的关系(图 1.37(f))。

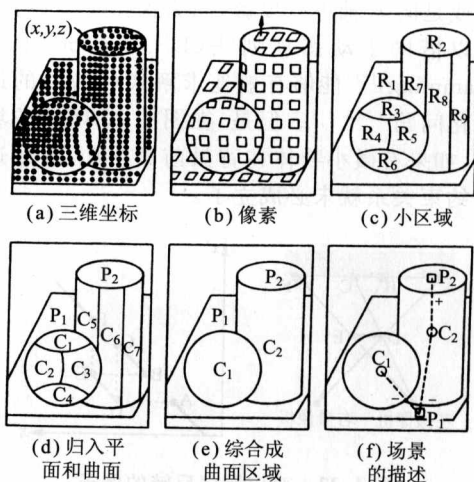


图 1.37 基于区域法的距离图像的分段

分割法的典型应用是距离图像的边缘识别^[35]。与灰度图像不同,距离图像的边缘直接反映场景的景深和法线方向的不连续性,而且不受对象表面图样或阴影的影响,所以它是分段的重要依据。图 1.38 举出了一个针对测距器三维数据(图 1.38(a))进行处理的例子。首先,应用 x 方向和 y 方向的微分算子对边缘进行检测,求出强度和方向,然后进行细化、门限值处理、连接处理,封闭边界求解(图 1.38(b))等,最后用线段和圆弧对边界线进行近似,描绘出它们所包围的表面(图 1.38(c))。

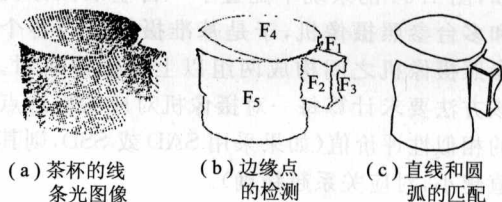


图 1.38 基于边缘检测的距离图像的分段

距离图像特性的应用事例,还可以举多面体近似分段方法^[36]的例子。以图 1.39(a)的距

离图像为例,该方法首先基于景深不连续性将背景进行分离,提取物体的轮廓线,再将它们近似成多边形,得到初始区域(图 1.39(b));接着从初始区域中检测出最远点,将该点与轮廓多边形的各个顶点连接做三角形分割(图 1.39(c));接下去,反复将各个三角形区域的最远点与各个顶点彼此连接,不断进行分割,直到三角形与最远点之间的距离小于门限值为止(图 1.39(d));然后,合并法线方向一致的毗连三角形,提取出平面区域(图 1.39(e));最后,对各个区域进行平面匹配,求取作为交线的边缘(图 1.39(f))。综上可知,本方法的处理过程是先将三角形进行分割,然后将同一平面上的三角形合并,所以也可以将其认为是 split-and-merge 方法的一种形式。

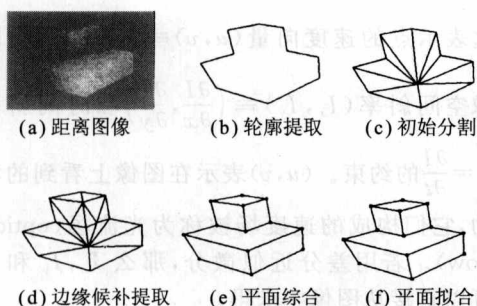


图 1.39 基于多面体近似的距离图像的分段^[36]

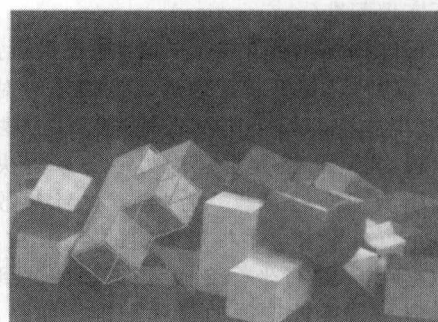
通过曲率表达的微分几何学的特点在于它描述了对对象的本质,与坐标的选取或外在形式无关。由此衍生出一种分类方法,就是计算距离图像上各个点的局部高斯曲率和平均曲率,根据它们的符号,确定各个点属于 8 种基本曲面的哪一种^[2]。但是,由于计算对噪声非常敏感,因此除了事先必须做平滑处理以外,还应该利用局部曲面拟合、等倾斜线法等^[21]处理以减轻噪声的影响。

2. 匹配与识别

物体识别(object recognition)就是从三维数据中提取特征,与事先登录在计算机内的模型特征进行匹配(matching),以确定物体的种类、位置和姿态。在三维世界中用传感器观察对象时,由于有时会看到背面,有时会被中间物体遮挡,未必能够看到对象的全貌,所以数据(即使部分数据)匹配显得十分重要。

特征是拟合的基本单元,它随对象类别和模型的表现形式的不同而不同。例如,用

边界线表示多面体,那么端点一致的两条线段所构成的角点(corner)即可选作特征。我们知道,如果两个角点重合了,那么位置和姿态(共 6 个自由度)就基本决定了;反过来,从数据确定物体的位姿时,在原理上,模型与数据之间有一组角点相互对应就可以了。因此,在初期拟合阶段,在数据和模型的角点中往往靠角度相似来设定物体的位姿。在此基础上,再验证模型其他部分的数据是否对应。如果对应部分较少,就重新回到初期拟合,尝试改换成其他角点的组合再看看,或者是更换模型自身。如果对应的部分足够多,那么就利用全部对应特征,重新计算物体的位姿,实施微调整。图 1.40 中的三维数据是从线段立体视觉得到的,再依据上述方法就得到了比较满意的识别结果^[33,34]。



(a) 多面体^[33]



(b) 自由曲面体^[34]

图 1.40 基于线段的立体视觉识别三维物体

在上述三个阶段中,初期拟合一般需要在较大范围内进行探索,所以计算成本会比较高。为了降低成本,有人开发了一种基于投票方式的所谓 geometric hashing^[18]方法。为了能从模型确定位姿,该方法首先选出最低数量的必要特征点作为基底构建坐标系,在

该坐标系中将剩余特征点表示出来,然后以坐标为指标制成表格,按照(模型、基底)组的形式进行登录。这个过程是以离线形式对模型所有的特征点组合实施的。识别时,从数据检测出的特征点组合中任选一组构成坐标系,再求出剩余特征点的坐标值,在表中进行投票。获得最高票的模型和基底给出了物体的种类和位姿。由于事先将模型数据库变换成表格的形式,所以这样的方法能够防止在初期拟合阶段以及随后的验证中可能发生的成本组合爆炸问题。

3. 多幅距离图像的配准

大多数距离传感器每次只能测量对象的部分信息。为了能得到对象物体的完整描述,往往需要改变视点,或者让物体进行转动,以便得到多个距离数据,然后在统一坐标系下实现配准(registration)。

ICP(Iterative closest point,迭代最近点)算法^[3]的特点是不断把最近点设为临时对应点,逐步进行两幅距离图像配准。该方法把图像视为模型,把数据视为另一方来解决数据向模型配准的问题。为此,首先针对数据的各个点分别求出最接近模型的点;其次,更改数据点群,进行坐标变换计算,以便达到数据点群与最接近点群的最佳配准。如是,通过数据的变动,能够起到减小配准误差的效果,反复进行上述过程,至少可以保证算法收敛到局部的最佳解。

如果配准的距离图像是从不同视点获得的,那么并非所有的数据点都具有对应关系,仅靠ICP算法往往无法得到正确解。此时建议改用另一种方法,该方法的特点是将随机采样和基于最小均方(LMedS; Laest Median of Squares)的ICP混合使用,并仅对重叠部分进行坐标变换^[20]。

1.4.3 运动图像处理

如果被观测对象或传感器处于运动状态,那么时间会对图像产生影响,图像中就不仅包含物体的三维信息,还包含物体或传感器的运动信息。从时序图像提取这些信息称为运动图像处理。从多幅图像三维复原的角度看,运动图像处理虽然与立体视觉有类似之处,但也不尽相同,即此时视点之间的位置

关系是未知的,它们也必须同时被计算出来。

1. 光流场的估计

运动图像分析的首要任务是对运动图像的跟踪,弄清楚一帧图像的某个部分对应于下一帧移动图像的哪一部分。如果邻近图像的帧间移动量很小,那么跟踪往往不依靠图面上的对应关系,而是依靠图像局部的时空变化。

设时刻 t 图像中的点 (x, y) 在时刻 $t + \Delta t$ 时移动到 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$,那么在移动前、后该点亮度 I 不变化的前提下,下式成立:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) - I(x, y, t) = 0$$

用 Δt 除上式等号两边,取 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限,得到

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1.24)$$

这表示点的速度向量 $(u, v) \equiv \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right)$ 受图

像空间斜率 $(I_x, I_y) \equiv \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right)$ 和时间斜率

$I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$ 的约束。 (u, v) 表示在图像上看到的移

动,它们构成的速度场被称为光流场(optical flow)。若用差分近似微分,那么 I_x, I_y 和 I_t 可以直接从图像中求得。

式(1.24)中含两个未知数 u, v ,却只有一个约束,故仅有此条件无法确定光流场。可以假设“图像内的速度向量平滑分布”,然后利用松弛法求出下式最小化所对应的 u, v ^[15]。

$$E = \iint_{\Omega} [(I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2)] dx dy \quad (1.25)$$

式中,下角字符表示偏微分。参数 λ 的作用是控制平滑度约束的程度,位于物体边界附近时约束不成立,故它应该变小,实际上对该参数的最佳取值是一个困难的问题。

如果具体确定 λ 的值有困难,打算放弃平滑度约束,那么可以改用多重滤波器方法^[6],由式(1.24)求解光流场。该方法的特点是借助于各向异性滤波器处理原图像,产生多幅图像,并针对各幅图像应用式(1.24)后再将它们联立起来,用最小二乘法求解 u, v 。

2. 基于光流场的运动估计

将摄像机的焦距距离规格化成1,设摄像

机对观测对象的相对速度、角速度分别为 \mathbf{v} 、 $\boldsymbol{\omega}$, 则该运动在图像点 $\mathbf{x} = (x, y, 1)^T$ 处引起的光流 $\dot{\mathbf{x}} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} = (u, v, 0)^T$ 为^[17]

$$\dot{\mathbf{x}} = -(\mathbf{I} - \mathbf{x}\mathbf{k}^T) \left(\frac{\mathbf{v}}{Z} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x} \right) \quad (1.26)$$

式中, Z 表示 \mathbf{x} 的景深; $\mathbf{I} \equiv \text{diag}(1, 1, 1)$; $\mathbf{k} \equiv (0, 0, 1)^T$ 。从式(1.26)中消去 Z , 得到摄像机无限小运动的双极约束式

$$(\mathbf{v} \times \mathbf{x})^T (\dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x}) = 0 \quad (1.27)$$

针对多个点建立联立方程, 原理上可以求出摄像机的运动参数 \mathbf{v} 、 $\boldsymbol{\omega}$ (消除 \mathbf{v} 倍数的不确定性)。如果已知运动参数, 由式(1.26)可以计算出景深 Z , 进而复原三维信息。

但是, 在现实中从包含噪声的图像微小运动精确估计全部运动参数是相当困难的。因此, 最好结合尽可能多的事前信息, 如掌握多点景深数据, 或者具体的运动类型等再行计算。

3. 基于方框匹配的特征点跟踪

方框匹配与立体视觉窗口匹配(图 1.31)的相同之处在于都是先设定窗口, 然后检查亮度模式的相似性, 求出当前帧内的点 P 在下一帧内的移动目标点 P' 。方框匹配与立体视觉的不同之处是方框匹配时双极线未知, 所以点 P' 的搜索区域不限于直线上。可见, 为限制搜索区域过大, 帧间的移动量必须足够小。另外, 如果窗口内的亮度仅发生单方向变化, 在垂直于亮度梯度的方向上会产生含糊度(开口问题, aperture problem)(图 1.41)。因此, 应该选择那些亮度分散性强且亮度模式沿多方向发生变化的地点(如拐角等)作为特征点进行跟踪。

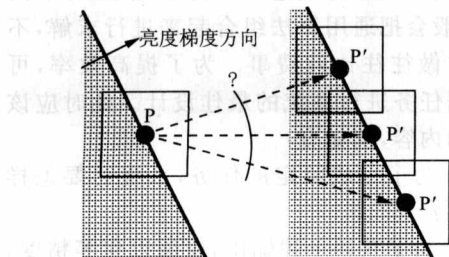


图 1.41 开口问题

4. 基于点对应的运动估计

假设靠特征点跟踪确定了两幅图像上的

点 P 、点 P' 的对应关系, 于是点 P 和点 P' 的同阶次坐标 $\mathbf{x} \equiv (x, y, 1)^T$ 和 $\mathbf{x}' \equiv (x', y', 1)^T$ 之间, 下列关系成立:

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0 \quad (1.28)$$

式中, \mathbf{F} 称为基本矩阵(fundamental matrix)^[19], 是具有常数倍不定性的、秩为 2 的 3×3 矩阵, 其自由度为 7。式(1.28)表示 1.4.1 节中的双极约束, 它是平行于立体摄像机条件下的式(1.21)的广义形式。

基本矩阵 \mathbf{F} 由摄像机的运动参数(转动和平移)与内部参数决定, 若给出 7 组点对应关系, 则需要求解 3 次方程式; 若给出 8 组以上的点对应关系, 则可以利用线性算法, 从式(1.28)中求解。特殊地, 若内部参数已知, 那么利用从 \mathbf{F} 提取的运动参数, 可以在欧几里得空间内复原场景的三维信息。

即使内部参数未知, 同样可以复原场景的三维信息, 但复原的含义有所不同, 即被复原点的坐标中保留了三维投影变换的不定性, 但是场景在欧几里得空间中所具有的特征, 如长度和角度等的值已经失去了意义^[9,12]。即便如此, 因为毕竟唯一确定了投影变换不变量的交比值(cross ratio), 因此仍能完成识别和机器人导航等任务, 如同人的手势一样。

5. 基于随机采样的对应

如果图像之间的移动量较大, 那么上述光流场和方框匹配的方法便不大适用了。为此, 人们研究出更有效的方法。方法的特点在于利用双极约束, 同时结合随机采样和鲁棒统计来求解对应点。

如上所述, 两幅图像之间的点互相对应时, 满足式(1.28)的双极约束关系。现在摄像机的运动是未知的, 所以 \mathbf{F} 也未知。不过 \mathbf{F} 有 7 个自由度, 如果能确定 7 组对应关系 $\{p_i \leftrightarrow p'_i | (i=1, 2, \dots, 7)\}$, 则 \mathbf{F} 可以被确定, 角标 8 以后的对应关系靠式(1.28)来约束。因此, 可以利用方框匹配等图像的局部相似性, 先粗略地求出点对应的候补项, 再随机选择 7 组对应关系来计算 \mathbf{F} , 然后利用该结果, 通过式(1.28)检验保留候补项的正确性。确定随机采样方法采样次数的依据是保证每次求证至少有 7 组正确的点对应(例如, 在 50% 误对应条件下, 达到 95% 比对概率的采样次

数约为 380 次)。再举一种 RANSAC (Random Sample Consensus) 方法^[27], 它经过多次采样, 从结果中选出正确对应概率最高的采样, 设其为真解。还有一种基于最小均方准则的方法^[29], 针对全部对应候补项计算验证误差, 并将其中的中间值最小的采样设定为真解。

6. 因子分解法

利用 I 帧图像对三维空间中的 J 个特征点 P_j 进行跟踪, 设第 i 帧中 P_j 的像为 p_{ij} ($i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$)。若用正投影或弱透视投影等的线性投影将摄像机投影模型近似, 将 p_{ij} 的坐标 $x_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})^T$ 对所有帧和特征点进行排列, 得到下列的 $2I \times J$ 矩阵 W :

$$W = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1J} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{I1} & \cdots & x_{IJ} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

该矩阵的秩始终为 3, 与帧数 I 和特征点数 J 无关。所谓因子分解法 (factorization method)^[26] 就是借助于奇异值进行分解, 把 W 分解成两个矩阵 (由摄像机运动参数构成的 $2I \times 3$ 矩阵 M 和由特征点坐标构成的 $3 \times J$ 矩阵 S) 的乘积, 据此来同时复原运动和三维信息。虽然在分解过程中存在三维仿射变换的不确定性, 但是这种不确定性可以利用 M 中摄像机旋转矩阵的正交性加以消除, 从而唯一地构造欧几里得空间的场景。

本方法的优点是对所有帧和特征点同时进行相同处理, 奇异值分解的数值运算本身很稳定, 所以其结果表现出很高的稳定性。正因为如此, 本方法正在以摄像机投影模型的形式向透视投影场合扩展^[13,30], 也正在向包含多个运动的分段应用方面^[7]普及。

植芝俊夫

1.5 主动视觉

1.5.1 什么是主动视觉

对于人类的视觉来说, 并非外界图像信息映现在视网膜上即可看见。只有在人们做出想要看的努力之后人类才能看到外界信息。把人类这种想要看的努力 (行为) 移植到机器人的图像处理中, 一般就称之为主动视觉 (active vision)。主动视觉的研究与人工智能、认识科学、心理学等的研究有着密切的关

系。它有一个对应的反义词, 叫做被动视觉 (passive vision), 其含义是研究如何识别从外界接收到的图像。也就是说, 它不包含对外界的“行为”。

主动视觉的研究是从亮度分析和运动图像处理方面衍生出来的, 在进行这些方面的研究时往往存在一幅图像提供的约束条件不够充分, 结果是解不够稳定 (ill-posed) 的问题^[1,2]。通过对摄像机施加某些主动的已知运动, 可以将不稳定问题化解成稳定的求解问题。所谓的狭义主动视觉, 是指利用这种人为附加的摄像机运动进行图像分析。如果将它进行抽象, 就是研究如何根据已知的摄像机参数使计算过程变得更加健壮的问题。

一种更先进的图像处理概念——动画视觉 (animate vision, purposive vision) 的研究也在进行中^[3]。人们为了达到一定的目的, 需要注视环境内各式各样的点。引入动画视觉后, 不仅可以使来自摄像机运动参数的图像处理计算更简化, 而且还能使注视点受控, 其适应性更强, 识别效率更高。动画视觉有三个主要的研究课题。

- ① 注视点在何处?
- ② 怎样补偿注视点之间的变动?
- ③ 怎样综合注视点之间的信息?

与上述由模仿人类视觉而兴起的学派不同, 还有一种纯粹的工程方法, 称为主动感知 (active sensing)。主动感知概念不仅限于模仿人类注视行动的摄像机运动等, 更关注图像输入时系统的健壮性, 例如, 改变一下照明的条件等。与它相关的研究课题在动机上与动画视觉不尽相同, 但结果却基本相似。

从机器人系统设计的理论也能引申出同样的解决问题的概念^[4]。为了解决某个问题, 一般会把通用算法组合起来进行求解, 不过这样做往往比较费事。为了提高效率, 可以根据任务进行系统的最佳设计。此时应该考虑的内容, 例如有:

- ① 为了完成给定的任务, 系统需要怎样的输出?
- ② 为了获得上述输出, 应该以何等精度, 以及应该描述系统内部的哪些状态?
- ③ 为了以一定精度描述系统内部的状态, 必须有什么样的处理模块?
- ④ 为了向上述模块提供必要信息, 需要

哪些传感器?

这种思路确立了一种根据任务要求自上而下、逐级设计模块的设计原则。说它是系统的设计原则固然不错,体会其中的思想,实际上它与先前的主动视觉是相通的。

1.5.2 主动视觉传感器

构建主动视觉摄像系统通常的做法是在 CCD 传感器上添加类似网膜的图像传感器(中心窝视觉传感器,retina-like sensors)^[5~7](图 1.42(上))。这种传感器中心部分的清晰度很高,周边部分的清晰度略低。人们通过对视野周边的粗略观测,掌握周围的宏观情况;再利用视野中心注视特定区域,对周围状况进行详细的观察。如果主动视觉中采用的传感器全部一样,那就不是对整个图像进行处理。而只剩下对中心部分进行处理。可以设想,这样的处理虽然速度比较快,但从光学系统的角度来看它有如通常的光学系统,存在若干个不足之处,例如,光圈单一,无法得到鲜明的图像等。

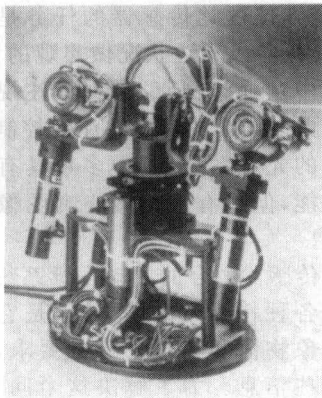
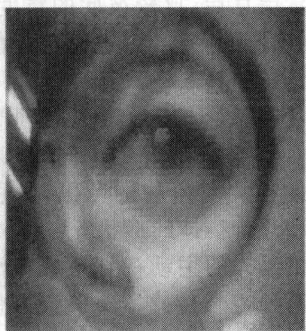


图 1.42 由中心窝视觉传感器得到的图像(上图)
和由中心窝传感器构成的注视系统(下图)
(国吉康夫提供)

众所周知,有一种传感器叫做全方位视觉传感器^[8~10],它能模仿人类对周边注视的功能。在全方位视觉传感器中,凸透镜(球面、圆锥、双曲面等)被设置在水平方向上,摄像机的视线相对于透镜中心垂直。这种视觉系统用单一摄像机对开阔区域进行摄像,其清晰度低,图像难免会有变形,但其优点是能以一幅图像浏览整个场景,所以在很多情况下,人们乐意把它与带有注视机构的其他摄像系统组合起来应用。

1.5.3 主动视觉的控制机构

从控制机构的角度可以对主动视觉进行如下分类。

1. 根据环境控制视觉传感器的主动视觉

此类视觉传感器的目的是根据环境条件改变视觉传感器的特性,以便获得更好的信息。改变的因素有摄像系统的内部参数(焦距、光圈、CCD 的 A/D 变换器等)、外部参数(位置、姿态)等,如果传感器有多个视觉系统,则它还包含对各个分系统相互关系的调节。

摄像机内部参数的变化将造成各种影响。例如,改变焦距能对变焦镜参数进行控制,光圈或 CCD 中 A/D 变换器特性的调节能对动态范围实施控制等,这样就既能对场景整体做宏观的观察,同时也能对特定部分做详细的辨认。

改变外部参数控制的典型事例如注视控制^[11,12]。如果移动机器人搭载了能对视线方向任意控制的双目摄像机,那么它就能实现对环境中的特定部位的注视^[13~15](图 1.42)。这里的问题是如何观测和获得被注视对象,即环境中的位置(注视点)。一种解决方案是观察当前输入的图像,确定下一个注视点。例如,从输入图像中并行地提取出各种特征量,把符合识别特征的点设为注视点^[16]。另一种解决方案是事先制定出预测某一状态未来趋势的规则,以此为依据来改变注视点。采用视觉观测人类的动作状况,实现对人类动作定性理解的系统^[17]就是主动注视控制的一个例子。它能观察人类的作业(行为)情况,以及由此导致的环境变化,定性估计并预测它们之间的关系。前一种方法是根据当前

图像确定下一个注视点,后一种方法则是根据状况预测注视点。总之,它们是不同的意义上的注视控制。

如果能主动改变外部参数,并利用运动信息的话,就有可能复原对象的景深和形状,达到移动立体视觉的效果。也就是说,运动参数已知的多幅图像,具有与多目立体视觉相同的效果,是可以将其用来复原物体景深值的。此外,人们还进行了一些根据环境对视觉传感器进行控制的主动视觉研究,例如,随着环境的变化动态改变立体视觉基线^[18]的方法等。这些方法虽然随单目或多目视觉原理不同,而且具体实施起来也有所差异,但它们有一个共同点,就是事先必须已知多幅图像之间的运动,然后才能讨论场景的具体状况。

2. 对环境光源控制的主动视觉

利用光源环境控制实现视觉识别的方法,可以列举照度差立体视觉(photometric stereo)^[19]、模式光照明立体视觉计量^[20]等的例子。

照度差立体视觉控制的对象是光源环境(强度和位置),将在多光源环境下获得的图像拿来分析,实现景深的复原(图 1.43)。假设对象表面的反射为全扩散反射(兰伯特面),那么图像中对象的亮度就由光源与对象之间的距离、摄像机视线方向与对象表面法线方向的关系这两个因素决定。如果已知光源位置的控制信息,那么对象表面的法线方向就可以得知,对象的形状就能被复原。如果改用面光源,依据同样的方法可以确定全镜面反射表面的形状^[21]。

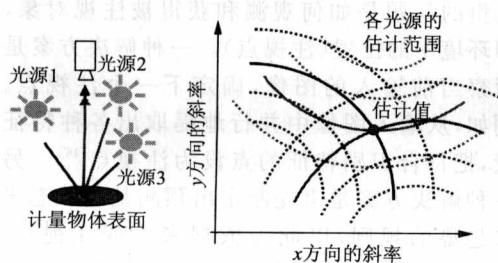


图 1.43 照度差立体视觉原理(从多个方向照射物体,由表面亮度差估计物体表面的斜率)

众所周知,被动视觉应用于立体视觉时,不大容易搜索到多视点图像上的对应点,不

过如果能合理利用光源控制,这个困难就比较容易解决。模式光照明和基于干涉条纹的立体视觉系统^[22]是上述思路的具体例子,它们的系统均由摄像机和模式光照明装置构成。如果已知摄像机与照明装置的几何学关系,那么由摄像机搜索模式光的照射点,即可得到对象的景深值。还有其他一些办法能更加正确、快速地对景深进行估计,如特殊模式光方法^[23,24]、特殊芯片高速检测方法^[25]等。

1.5.4 传感器融合与主动视觉

在机器人视觉设计中常可以见到多个传感器组合应用的例子。传感器融合(sensor fusion)是对特性互不相同的多个传感器输出实施融合,从而提高机器人对外观测的数量和质量的一种传感器搭配形式。从融合的效果看,可以将其分为竞争融合和互补融合两种。

所谓竞争融合,是指用多个传感器获得同一种信息的融合。例如,多个传感器获得对象的位置信息后,比较彼此的精度、观测的可靠性、传感器的特性等,进而选择能估计出准确位置信息的算法。

所谓互补融合,是指将不同种类信息的传感器组合起来进行观测。例如,某个系统用彩色图像检测对象物的范围,又用距离传感器检测和评价物体的形状等。

移动机器人的主动视觉系统广泛采用不同特性的两种视觉传感器——全方位视觉传感器和注视控制传感器^[26]的组合形式(图 1.44)。全方位视觉传感器的任务是观察周围环境,对机器人周边状况做宏观的评测,然后从图像中选择注视点,借助于注视控制传感器获得更为详细的信息。注视控制传感器采用通常的光学系统,其中多数具有双目立体视觉功能,但也有改用中心窝图像传感器的例子^[7]。

基于传感器融合的主动视觉系统具有获取环境中各种特征量的能力,但是它需要针对识别对象物体和具体的任务要求,选定应该获取哪些信息。为了解决这个问题,人们正在研究机器人运用有关作业知识自动生成视觉识别战略的方法^[27]。例如,预测物体装配作业情景中可能发生什么情况,制定后续

状态下获取足够的物体识别图像信息的战略等。

池内克史 中泽笃志

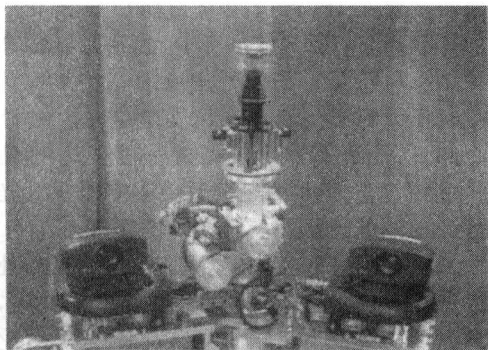


图 1.44 全方位视觉传感器和注视控制传感器组合的移动机器人系统举例(八木康史氏提供)

1.6 实时视觉

1.6.1 什么是实时视觉

所谓实时视觉,就是做到“为满足现实世界的某个目的(例如,开动机器人,构建人机界面等),对图像进行实时识别的在线运动图像处理”。显然,从图像认识瞬息万变的环境来看,高速处理是必要的,直到几年前,如果手头没有专用图像处理装置的话还是很难达到实时视觉的。不过近年来情况发生了变化,随着硬件(摄像装置和计算机)性能的提高和价格的降低,实时视觉得到迅速推广。

与实时视觉接近的领域还有计算机视觉和机器人视觉。计算机视觉的任务是确立“如何由视觉信息正确地构建三维世界”的理论体系,它基本上与硬件无关。机器人视觉的任务则不仅仅是“watch while moving”型的图像处理(运动中连续识别图像),而且一旦停下来,它仍然需要保持识别-运动交替的模式,继续对静止图像实施观察,即具有“stop and watch”型的图像识别功能。从这个意义看,机器人视觉与实时视觉在概念上略有不同。

1.6.2 实时视觉的历史^[1]

基于图像的物体识别的研究始于 20 世纪 60 年代。20 世纪 70 年代,图像输入和输出帧存储器问世后,微型计算机的在线图像

处理成为可能。几乎在同一时间,图像处理专用硬件的开发也起步了,图 1.45 为这一时期的典型硬件系统结构。但是这些系统处理一帧图像仍需花费秒数量级的时间,只能满足“stop and watch”型识别的要求。早期的“watch while moving”型处理系统是 20 世纪 80 年代中期开发出来的 MWVS(Multi Window Vision System)^[3]。该系统采用如图 1.46 所示的体系结构,即在图像内开出多个注视窗,让处理器分别就各个窗口进行所谓的并行处理,这表明当时人们已经清楚地掌握应该

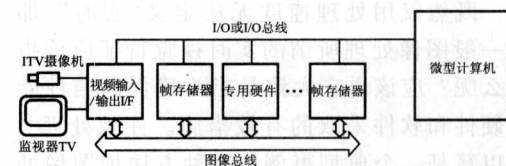


图 1.45 微型计算机+帧存储器+专用硬件

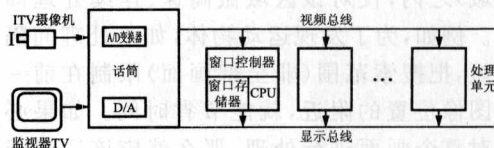


图 1.46 MWVS 的构成

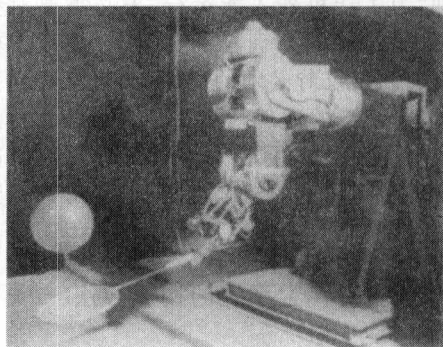


图 1.47 乒乓球机器人(东芝)

进入 20 世纪 90 年代后,半导体技术得到迅速发展,高速 DSP(Digital Signal Processor)和运动图像处理专用 LSI 问世,实时视觉硬件系统商品的价格变得越来越便宜。进行机器人视觉研究的人员这才得以真正进入实时

视觉研究的新阶段。90年代后期,个人计算机的性能也开始足以胜任对运动图像处理的要求,于是出现了廉价的处理系统。现在,在机器人控制中采用运动图像处理已经相当普遍了。

1.6.3 实时视觉的特征

实时视觉的“实时”这个词,并没有具体定义必须达到何等处理速度。在运动图像处理的研究初期,10Hz的图像处理速度就可以被认为达到了实时的要求,现在的大致标准在30Hz(NTSC规格的帧速率)的数量级。不过,因为帧速率是随摄像装置的不同而变化的,所以上述标准不是绝对的。实际上,图像处理任务不同,所需要的实时性程度也有区别。

既然仅用处理速度无法定义“实时”,那么一般图像处理所谓的实时视觉特征应该指什么呢?应该说它大致是指为确保高速性能对硬件和软件采取的有效措施。注视处理^[6]可以算是一个典型事例。这种方法把图像处理的对象限制在图像的某一个部分(即注视区域)之内,仅对该区域做高速、连续处理即可。例如,为了发现运动物体,如果处理间隔很短,把搜索范围(非全部画面)限制在前一帧图像位置的附近,就能节省时间。如果必须对整个画面进行处理,那么就应当适当降低图像的清晰度。这些方法都是基于下列考虑,即“为了让机器人能运行,未必需要对整个画面做细微的处理。事实上,宏观只需做粗略处理,仅仅对必须的局部,如对象物和手部周围做细微的处理就够了。”这种思路从人类的视觉处理中(网膜中心窝部分具有很高的清晰度,而周边的清晰度较低)也可以得到印证。

1.6.4 实时视觉系统的构成方法

近年来,大多数实时视觉系统可以按照下列四种形态来进行分类:

- ① 通用计算机。
- ② 通用计算机+图像处理端口。
- ③ 基于DSP的系统。
- ④ 视觉芯片。

以下分别叙述系统实例和特征。

1. 通用计算机

由于处理器的性能已经相当不错了,现在以PC机为代表的通用计算机本身就能完成实时图像处理,再选用与摄像机输出相匹配的捕获卡和IEEE1394卡向主存储器传递图像信息就行了。图像处理中的一些多媒体命令,如Intel Pentium系列处理器的MMX命令和SSE命令等,可以提高处理速度,即使是生成计算量较大的距离图像,或者针对光流场的图像处理都能满足实时的要求^[7]。

基于通用计算机,特别是PC机的视觉处理系统具有许多优点。例如,系统价格低廉,处理器的性能可以不断升级,存储器空间比较大,无须特殊开发环境,小型或笔记本式PC机也能胜任等。不过,这样的系统也存在若干问题,诸如无图像专用数据库,大量图像数据输入和处理时总线带宽不够等。另外还要注意一点,就是为了达到软件处理效果最佳,对程序安装的要求比较高。为了解决上述问题,现在已经出现了许多产品化的程序库和开发环境。

2. 通用计算机+图像处理端口

多数与通用计算机组合应用的图像处理端口已经被产品化了,在研究和产业用途中它们均大有用武之地。典型的图像处理卡搭载有图像专用处理器、帧存储器、图像输入/输出I/O以及与主计算机通信的I/O。典型的系统产品有相关运算功能专用图像处理卡(富士通彩色跟踪视觉^[8])、集成了规格化相关运算和滤波等多种处理功能的视觉硬件卡(日立IP5000^[9])、搭载一维SIMD高速并行处理器的视觉卡(NEC IMAP-Vision^[10])、以及按流水线型体系结构设计的视觉卡(Datcube公司的MaxPCI等)。

3. 基于DSP的系统

专为组合系统设计的DSP属于信号处理专用LSI,它特别适合简单、高速地处理庞大的数据。DSP的性能价格比一般都比较高,多数DSP(例如,Texas Instruments的TMS320系列)在设计时就考虑到组成并行机器结构的方便性,所以特别适合并行图像的处理。不过它也有缺点,在DSP命令集里,多数命令很难用高级语言编译器进行解释,代码的调准比较困难,导致其开发效率比较低。

典型的 DSP 图像处理系统有专用实时距离图像生成系统^[11,12]、MIMD 型线性阵列结构的通用图像处理系统(富士通 ISHTAR^[13])等等。

4. 视觉芯片

所谓视觉芯片,就是把感光元件与图像处理电路集成在同一块芯片上的器件。CCD 和 CMOS 图像传感器通常只能进行图像检测,而将图像处理任务交给其他计算机来完成。与此不同的是,视觉芯片本身甚至能完成特征提取的任务。视觉芯片上的每一个像素都自带处理电路,因此它能做大规模并行运算,实现高速处理。

石川等开发的视觉芯片^[14]属于集成光输入处理元件的 VLSI。它能在 1ms 的周期内实现对机器人的视觉反馈,从而组成高速目标跟踪系统。三菱电机公司开发的一款网膜芯片^[15]将 CMOS 图像传感器与图像处理电路集成在一块芯片的系统 LSI 中,该芯片具有电源单一、耗电量少等优点,在游戏机和移动电话的图像输入中得到应用。

1.6.5 实时视觉的应用^[15]

实时视觉并不仅仅用于机器人视觉识别功能,它在各种领域中的检测手段中也得到了广泛应用,其有代表性的应用领域如下:

- ① 人机界面。
- ② 人类和动物的行动分析。
- ③ 安全。
- ④ 虚拟现实技术。
- ⑤ 产品检查。
- ⑥ 医疗设备。
- ⑦ ITS(现代化交通系统)。

可以预测,今后计算机的性能(处理速度和存储器等)、摄像机的性能(清晰度和帧速率等)都将越来越高。因此,非接触、非侵入式检测的实时视觉技术将会在越来越多的领域中得到应用。

松本吉央

1.7 机器视觉在生产技术中的应用

1.7.1 多样化的机器视觉

以工业机器人视觉为开端,在 20 多年前机器视觉技术就开始引入工厂的生产现场,

并在其后得到顺利发展^[2,3,7]。如果我们追溯一下图像处理在产业中发展的进程,从图 1.48 可以了解到,其应用的确是绚丽多彩的^[6~8]。目前,机器视觉市场已经进入成熟的个性化时代,也就是说,无论它对性能和功能的要求有多高都能得到满足,产品既可以批量化,也可以个性化。

生产现场就是工厂。工厂产品需要检查和质量管埋,严格地讲,这有两层意思:一层意思是“为了生产者”;另一层意思是“为了用户”。第二层意思希望机器视觉系统能够满足用户各种各样的要求,即真正达到与人类“感性”相仿的水平。本节特别从这一角度出发,对其在各个领域的应用做概括的说明。

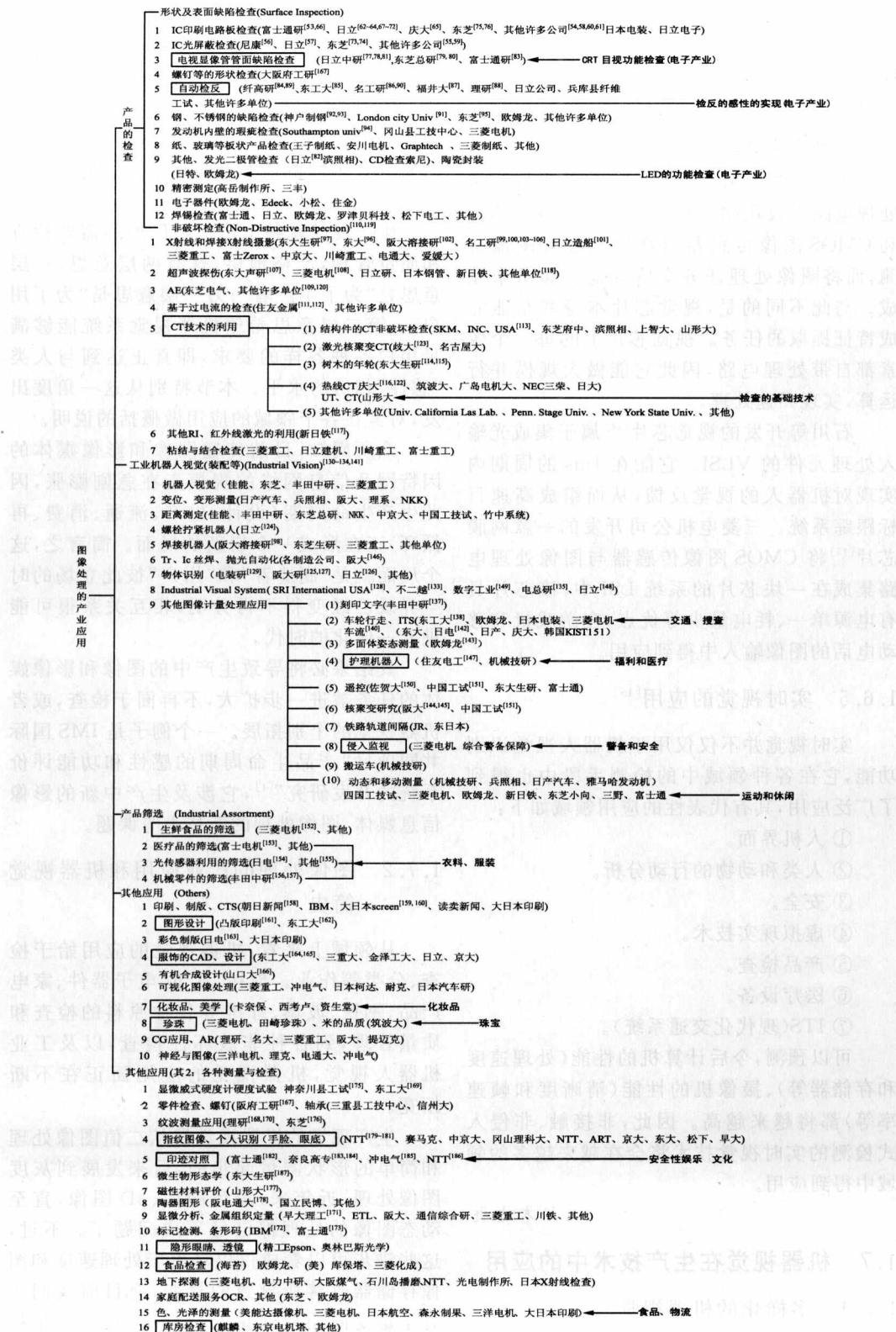
众所周知,目前传输图像和影像媒体的因特网及信息网络的规模正在急剧膨胀,因此生产生命周期(设计、生产、流通、消费、再循环)正在形成一个崭新的局面。简言之,这个局面就是“制造者”和“用户”彼此立场的时空界线已经变得不再分明,相互关系很可能进入一体化的时代。

其结果必将导致生产中的图像和影像媒体的任务被进一步扩大,不再囿于检查,或者机器视觉的个别拓展。一个例子是 IMS 国际共同项目“产品生命周期的感性和功能评价系统的开发研究”^[4],它涉及生产中新的影像信息媒体、图像处理的高新技术等课题。

1.7.2 图像处理的产业应用和机器视觉简史

从领域上来看,机器视觉的应用始于检查、分类等作业。现在,从 IC 电子器件、家电产品、钢铁、玻璃、纤维等各种原料的检查和质量管理,到各种非破坏性检查,以及工业机器人视觉,机器视觉的应用面正在不断拓宽。

生产现场的机器视觉是从二值图像处理和简单的形状测量起步的,后来发展到灰度图像处理,近年来,彩色图像、3D 图像,直至动态图像的处理都已经不成问题了。不过,这些进步可以看成仅仅是由于处理速度和图像存储器改善所导致的量变,而目前我们正处于量变向质变转化的过程中,其标志是搭载摄像机的 PC 机,即机器视觉正在渗透到我们的日常生活的各个角落。



注:文献的号码为文献[6]中的号码。

图 1.48 图像处理的产业应用(机器视觉)一览

事实上,对图像处理的产业应用(机器视觉)一览(图 1.48)进行认真分析后我们会发现,这种质变已经开始了。例如,在视觉检查方面,用户们要求从感性出发建立严格的规范,而在非产业领域(安全、服装、化妆品、食品、医药品制造、农产品和水产品等)方面的应用得到迅速拓展。这些应用超出了传统图像检查技术、图像和影像信息媒体的范围,可能会衍生出新的应用领域。

1.7.3 工厂外的机器视觉^[1,5]

图像和影像媒体技术能将彩色监视器的色调与用户的感性融合在一起进行检查,也能通过监视摄像机来观察人们的行动。也就是说,机器视觉摄像机不仅在工厂一类结构环境中应用,而且已经扩大到日常生活这样的非结构环境中。

1. 机器视觉在车辆方面的应用

“ITS 智能运输系统”是一项以道路、交通和车辆的信息管理为目的的研究课题。它涵盖先进的导航系统、自动收费系统、安全运营管理、交通管理最优化和高效化、公共交通支援、步行者支援,以及紧急车辆运营等 9 个领域。它研究的对象是非结构环境——街道和道路,是完全不同于传统工厂的环境所以它面临着全新的课题。

图 1.49 是一个固定在道路上的机器视觉系统,对注册车辆进行跟踪。当然机器视觉也有另外一些在车辆方面的应用事例,例如,利用车载摄像机检查自动运行、进行障碍

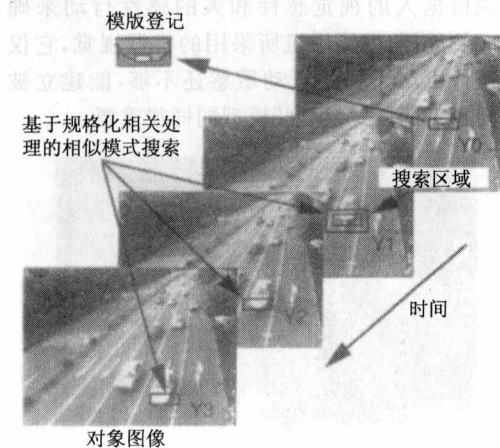


图 1.49 检测交通流量和通行车辆的机器视觉
(日立研究所,小林芳树氏提供)

物检测、检查驾驶员瞌睡等。

2. 机器视觉在市区、办公室和学校的应用

目前,通过行驶车载摄像机获取影像再生成市区三维模型的研究受到关注。城市工程、市场运营、游戏、娱乐等都十分需要相关数据。通过 GIS 或地图数据库共享,形成多媒体地图,也是人们追求的目标。人们在与工程作业、城镇测量打交道时,发现这些技术对后勤保障、提高效率、保证安全等方面都很用处。

近年来,由于运动图像处理技术的进步,机器视觉已经能基本实现在市区内对自然环境中的人物进行跟踪了。在图 1.50 中给出一个对公园内行人进行跟踪的例子。

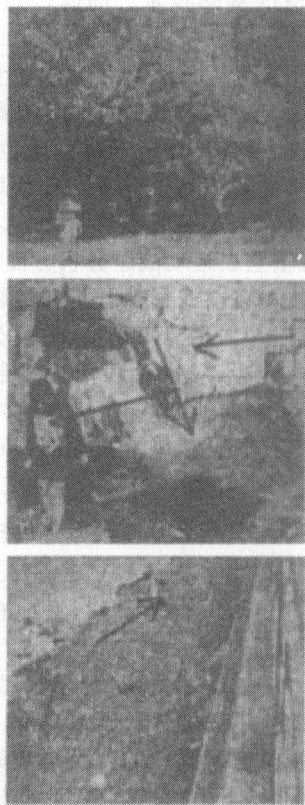


图 1.50 机器视觉跟踪市区(公园)行人(由综合
警备保障,山口顺一氏(现供职于 香川大学)提供)

在多数场合下,学校、办公室环境与市区街道环境相差不大,在这些地方肯定会有人群活动,他们被视为机器视觉的处理对象。

用复印机复印文件,有时不得不对用书面翘曲而造成的影印件歪斜或阴影进行修

正,所以产生了社会对电子图书馆(数字图书馆)的需求,机器视觉是建立电子图书馆的重要技术。

机器视觉在学校里也具有应用前景。在 OHP、投影仪等许多视觉信息仪器中,机器视觉投入应用的机会和需求都很大。现在,人们正在尝试用多媒体(特别是视觉文书和图像)将讲义和授课场景记录下来以便长期保存。其他正在大力开展的研究项目有办公室导向机器人视觉、手势操控室内电子仪器的视觉界面等。

3. 机器视觉在广播、媒体、游戏和体育运动中的应用

人们对机器视觉寄予极大的期望,视它为智能图像传送、MPEG、WowWow、Decorder 等图像通信的基础技术。同时,它还是丰富广播节目的一项新技术。在体育运动中机器视觉更有用武之地,例如,在马拉松实况转播中预测选手到达终点的时间、跟踪高尔夫球飞行的轨迹、追寻足球运动员的跑位、捕捉体操选手瞬间的姿势和轨迹等。有些场合人们甚至不大在意机器视觉在影像内容上的趣味性,而更看重它在运动战略分析方面的用途。

图像技术在电视影像分析和编辑制作中更是如鱼得水,如在剪辑切换、剪辑分配的自动化方面。今天,技术手段对电视制作的影响甚至已经渗透到影像内容的具体制作方面,在这个新领域中,机器视觉同样可以崭露头角。

4. 机器视觉在医疗、福利、家庭中的应用

许多机器视觉摄像机已经进入到医疗、福利和家庭领域。举例说明,目前在医疗方面开展的研究有虚拟内窥镜(与 CG 技术配合)、术前/术中的支援、远程医疗、为视觉障碍者配备的人工三维感觉显示器等。

机器视觉在家庭中的普及与数码相机紧密相关,这得益于后者与个人计算机连接的便利性。按照这个势头发展下去,“每家(每人)一台机器视觉”的时代也就为期不远了。实际上已经有很多令人瞩目的机器视觉成果已经在家庭中得到普及,例如,家庭摄像机的电子防晃补偿装置、视线聚焦摄像机、(对被捕获对象的)均匀画面连续摄像机,以及 CM 断续 VTR 等。空调机的舒适控制、收视率的

自动调查、高龄人群护理等,时代对高质量生活的要求更促进了机器视觉新技术的研发。

5. 像人那样观看人的机器视觉基础技术开发

像人那样观看人的机器视觉新技术的特征既是“能像人那样进行观看”,又是“能够对人进行观看”。

1) 以人为对象的机器视觉基础技术的开发

此标题表明,以人为对象的图像处理技术是今后机器视觉的关键技术之一。与这项技术有关的研究内容包括:对人的跟踪和观察(对可疑人物进行监视、对瞌睡人员的警告、体育运动、医疗),类人界面(手势、动作、手语、说话口型、指向),形状(美容整形、牙齿修补),个人认证(虹膜、面孔、耳壳、指纹、指头形状、名片),识别(面孔、表情、姿势、人数计算)等。

2) 摄像机的新成就

市场强烈要求开发小型、轻型、清晰度、灰度等级范围可调的摄像机。为了回应这种市场需求,人们开展了不少有趣的探索,其中引入注目的有超过 80dB 等级的摄像机、高分辨率随机存取摄像机(巧妙使用 400 万像素的 CMD 固体摄像器件,做到高分辨率和实时存取运动图像)、具有上下两层分割光路的车载摄像机、各种各样的距离传感器、集成光纤距离传感器 FG(光纤格栅)、全方位摄像的全景摄像机等。

3) 人的视觉感性模型

像人那样看人的机器视觉模型的设计指标必须根据人的视觉感性和人的感性行动来确定。例如,监视摄像机所采用的机器视觉,它仅对摄像机前人物的行动敏感还不够,能建立被捕捉行动的“可疑程度”模型同样很重要。

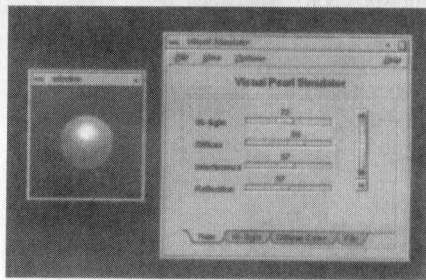


图 1.51 珍珠的感性信息处理举例
(三菱电机,长田典子(现供职于关西学院大学)提供)

珍珠品质的分选、化妆有效性的判定、布帘审美评价、图像数据库的感性检索、食品和医药品等的感性检查等,都促进了对机器视觉感性的研究。图 1.51 给出了珍珠分选系统中有关感性信息处理的例子。

1.7.4 智能制造系统(IMS)中的新机器视觉

以因特网为代表的计算机信息通信基础设施已经开始渗透到社会的各个角落。“关于产品生命周期的感性和功能评价系统的开发研究”项目(HUTOP)^[4]指出,新的全局生产系统不久即将诞生。那么在新的全局生产系统中图像处理的未来景象如何呢?

1. HUTOP 中图像处理应用研究举例

1) 产品感性评价虚拟环境的研究

用计算机表现室内空间,在整个虚拟空间中配置家具,以便对家具的色彩、形状、质感等进行整体评价。将室内环境的模型化与图像处理,以及机器视觉等基础技术结合产生的影像信息媒体技术,能够更生动地反映人的感性。图 1.52 给出一个家庭室内环境模型化的例子。

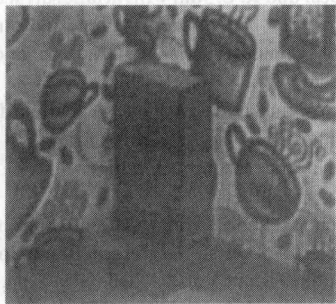


图 1.52 家庭室内环境模型化举例
(IMS 项目(香川大学,秦教授提供))

2) 基于面孔影像媒体的感性表现研究

消费者与生产者之间感性交流的需求催生出肖像画生成和表情生成技术。一般来说,除了用户面庞建模、传统图像处理和模式识别技术必不可少以外,为了表现人的感性,即实现面部个性的提取和生成(肖像画生成)、表情的提供和生成(表情肖像画的生成),面孔影像媒体研究将发挥极其重要的作用。图 1.53 给出面孔影像媒体研究的一个实验例子。



图 1.53 面孔的新媒体——肖像画
(计算机 PICASSO 作品,吉田胜彦作品)

3) 多模态(视觉、触觉、听觉)媒体

从影像媒体得到的感性认识还包括产品质感触觉、产品纹理触觉等多方面的信息。为了构建触觉感知系统,需要开展与影像信息有关的多模态媒体研究,甚至进行影像信息与语音信息媒体的综合研究。

2. 其他试验

在 HUTOP 项目计划中,除了从整体上开展生产中的感性语言和人为因素的调查分析、感性评价技术的调查和趋势分析外,还包括下列研究内容:个人设计 CAD 技术开发、感性信息仿真器开发、产品生命周期颜色信息评价、基于主动视觉的特征提取、操作工初级非编程视觉识别技术开发、人机友好/作业环境舒适的生产系统开发、生产过程中操作工知识和经验学习方式的研究等。机器视觉曾经一度局限在工业产品的检查等方面,如今,生产现场图像和影像媒体新应用的探索推动着机器视觉技术的进一步发展。

1.7.5 结束语

影像信息媒体最早在生产中应用的事例是计算机图像处理检查作业,随后又有了各种机器视觉系统的开发。本节对迄今为止机器视觉的发展做了回顾,并通过实例,考察了近年来机器视觉在生产现场、城市街道,乃至家庭等非结构环境中应用的情况,还介绍了能够处理人的感性影像信息媒体技术的开发活动概况。

本节还对 IMS 国际项目“产品生命周期的感性和功能评价系统的开发研究”(HUTOP)的研究活动进行了简单介绍,该项目的研究内容就是如何评估新的生产生命周期。社会的发展使生产现场与消费者现场的

区别在时空上变得越来越模糊,基于这样的认识,本节就新机器视觉、视觉信息的处理和识别技术在生产中的应用进行了展望^[9]。

奥水大和

参考文献

1.2 视觉输入装置

- [1] 米本和也: CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用—原理, 構造, 動作方式, 諸特性からシステム概要まで, CQ 出版 (2003)
- [2] 安藤隆男, 菰淵寛仁: 固体撮像素子の基礎—電子の目のしくみ, 日本理工出版会 (1999)
- [3] 鈴木茂夫: CCD と応用技術, 工学図書 (1997)
- 1.3 二维処理**
- [1] 長尾真: 画像認識論, コロナ社 (1983)
- [2] D. Ballard and C. Brown (福村晃夫ほか訳): コンピュータ・ビジョン, 科学技術出版社 (1982)
- [3] B. Horn: (NTT ヒューマンインタフェース研究所, プロジェクト RVT 訳): ロボットビジョン, 朝倉書店 (1986)
- [4] 白井良明編: パターン理解, オーム社 (1987)
- [5] 鳥脇純一郎: 画像理解のためのディジタル画像処理, 昭晃堂 (1988)
- [6] 江尻正良, 大田友一, 池内克史: マシンビジョン, 昭晃堂 (1990)
- [7] S. Ullman: High-level Vision, The MIT Press (1995)
- [8] N. Otsu: A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Trans. SMC, Vol.SMC-9, No.1 (1979) pp.62-66
- [9] R. Szeliski: Video mosaics for virtual environments, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.16, No.2 (1996) pp.22-30
- [10] K. Rao and P. Yip: Discrete Cosine Transforms—Algorithms, Advantages, Applications, Academic Press (1990)
- [11] D. Marr and E. Hildreth: Theory of edge detection, Proc. of Royal Society of London, Vol.B-207 (1980) pp.187-217
- [12] J. Canny: A computational approach to edge detection, IEEE Trans. Vol.PAMI-8, No.6 (1986) pp.679-698
- [13] D. Ballard: Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes, Pattern Recognition, Vol.13, No.2 (1981) pp.111-122
- [14] Y. Lamdan and H. Wolfson: Geometric Hashing: A General and Efficient Model Based Recognition Scheme, Proc. in International Conference on Computer Vision (1988) pp.213-229
- [15] 松山, 久野, 井宮編: コンピュータビジョン, 技術評論と将来展望, 第10章 Hough 変換: 投票と多数決原理に基づく幾何学的対象の検出と識別, 松山隆司, 和田俊和 (1998) pp.149-165
- [16] M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos: Snakes: Active contour models. International

Journal of Computer Vision, Vol.1, No.4 (1987) pp.321-331

- [17] 松山, 久野, 井宮編: コンピュータビジョン, 技術評論と将来展望, 第11章 コンピュータビジョンにおける最適化手法—モデルの妥当性と解の安定性, 天野晃 (1998) pp.166-194
- [18] H. Freeman: Computer processing of line-drawing images, Computer Surveys, Vol.6, No.1 (1974) pp.57-97
- [19] C. Zahn and R. Roskies: Fourier descriptors for plane closed curves, IEEE Trans. on Computers, C-21 (1972) pp.269-281
- [20] R. M. Haralick et al.: Textual features for image classification, IEEE Trans., Vol. SMC-3, No. 6 (1973) pp.610-621
- [21] S. Geman and D. Geman: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, No.6 (1984) pp. 721-741
- [22] A. Witkin: Scale-Space Filtering, Proc. 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (1983) pp.1019-1022
- [23] 松山, 久野, 井宮編: コンピュータビジョン, 技術評論と将来展望, 第4章 多重解像度解析—スケールスペースとその応用, 守田了 (1998) pp.54-63
- 1.4 多维图像处理**
- [1] N. Ayache and B. Faverjon: Efficient registration of stereo images by matching graph descriptions of edge segments, International Journal of Computer Vision, Vol.1, No.2 (1987) pp.107-131
- [2] P. J. Besl and R. C. Jain: Invariant surface characteristics for 3D object recognition in range images, Computer Vision, Graphics and Image processing, Vol.33, No.1 (1986) pp.33-80
- [3] P. J. Besl and N. D. McKay: A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2 (1992) pp.239-256
- [4] S. Birchfield and C. Tomasi: Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo, International Journal of Computer Vision, Vol.35, No.3 (1999) pp. 269-293
- [5] R. C. Bolles, H. H. Baker and D. H. Marimont: Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion, International Journal of Computer Vision, Vol.1, No.1 (1987) pp.7-55
- [6] H.-J. Chen, Y. Shirai and M. Asada: Obtaining Optical Flow with Multi-Orientation Filters, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (1993) pp.736-737
- [7] J. Costeira and T. Kanade: A Multi-Body Factorization Method for Motion Analysis, Proc. 5th International Conference on Computer Vision (1995) pp.1071-1076
- [8] I. J. Cox, S. L. Hingorani and S. B. Rao: A maximum likelihood stereo algorithm, Computer Vision and Image Understanding, Vol.63, No. 3 (1996) pp.542-567

- [9] O. D. Faugeras : What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? Proc. 2nd European Conference on Computer Vision (1992) pp.563-578
 - [10] D. Geiger, B. Ladendorf and A. Yuille : Occlusions and binocular stereo, International Journal of Computer Vision, Vol.14, No.3 (1995) pp.211-226
 - [11] R. I. Hartley : Theory and practice of projective rectification, International Journal of Computer Vision, Vol.35, No.2 (1999) pp.115-127
 - [12] R. Hartley, R. Gupta and T. Chang : Stereo from Uncalibrated Cameras, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (1992) pp.761-764
 - [13] A. Heyden, R. Berthilsson and G. Sparr : An iterative factorization method for projective structure and motion from image sequences, Image and Vision Computing, Vol.17, No.13 (1999) pp.981-991
 - [14] R. Horaud and T. Skordas : Stereo correspondence through feature grouping and maximal cliques, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, No.11 (1989) pp.1168-1180
 - [15] B. K. P. Horn and B. G. Schunk : Determining optical flow, Artificial Intelligence, Vol.17, No.1-3 (1981) pp.185-203
 - [16] T. Kanade, A. Yoshida, K. Oda, H. Kano and M. Tanaka : A Stereo Machine for Video-rate Dense Depth Mapping and its New Applications, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (1996) pp.196-202
 - [17] K. Kanatani : Statistical Optimization for Geometric Computation : Theory and Practice, Elsevier Science, Amsterdam (1996)
 - [18] Y. Lamdan and H. J. Wolfson : Geometric Hashing : A General and Efficient Model-Based Recognition Scheme, Proc. 2nd International Conference on Computer Vision (1988) pp.238-249
 - [19] Q.-T. Luong and O. D. Faugeras : The fundamental matrix : Theory, algorithms, and stability analysis, International Journal of Computer Vision, Vol.17, No.1 (1996) pp.43-75
 - [20] T. Masuda and N. Yokoya : A robust method for registration and segmentation of multiple range images, Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.3 (1995) pp.295-307
 - [21] A. M. McIvor and R. J. Valkenburg : A comparison of local surface geometry estimation methods, Machine Vision and Applications, Vol.10, No.1 (1997) pp.17-26
 - [22] G. Medioni and R. Nevatia : Segment-based stereo matching, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol.31, No.1 (1985) pp.2-18
 - [23] Y. Ohta and T. Kanade : Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.7, No.2 (1985) pp.139-154
 - [24] M. Okutomi and T. Kanade : A multiple-baseline stereo, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.4 (1993) pp.353-363
 - [25] M. Oshima and Y. Shirai : Object recognition using three-dimensional information, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.5, No.4 (1983) pp.353-361
 - [26] C. Tomasi and T. Kanade : Shape and motion from image streams under orthography : a Factorization method, International Journal of Computer Vision, Vol.9, No.2 (1992) pp.137-154
 - [27] P. H. S. Torr and D. W. Murray : The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix, International Journal of Computer Vision, Vol.24, No.3 (1997) pp.271-300
 - [28] T. Ueshiba, Y. Kawai, Y. Ishiyama, Y. Sumi and F. Tomita : An Efficient Matching Algorithm for Segment-Based Stereo Vision Using Dynamic Programming Technique, Proc. IAPR Workshop on Machine Vision Applications (1998) pp.61-64
 - [29] Z. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras and Q.-T. Luong : A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry, Artificial Intelligence, Vol.78, No.1-2 (1995) pp.87-119
 - [30] 植芝俊夫, 富田文明 : 奥行パラメータの逐次推定による多視点透視投影画像のための因子分解法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J 81-D-II, No.8 (1998) pp.1718-1726
 - [31] 大田友一, 山田博三 : 動的計画法によるパターンマッチング, 情報処理, Vol.30, No.9 (1989) pp.1058-1066
 - [32] 河井良浩, 植芝俊夫, 石山豊, 角保志, 富田文明 : セグメントベースステレオにおける連結性に基づく対応評価, 情報処理, Vol.40, No.8 (1999) pp.3219-3229
 - [33] 角保志, 富田文明 : ステレオビジョンによる3次元物体の認識, 信学論 (D-II), Vol.J 80-D-II, No.5 (1997) pp.1105-1112
 - [34] 角保志, 河井良浩, 吉見隆, 富田文明 : セグメントベースステレオによる自由曲面体の認識, 信学論 (D-II), Vol.J 81-D-II, No.2 (1998) pp.285-292
 - [35] 富田文明 : 3次元物体の境界線に基づく記述の生成と認識, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J 71-D, No.2 (1988) pp.343-349
 - [36] 村瀬晋二, 佐藤幸男 : 多面体近似を用いた距離画像の領域分割, 情報学シンポジウム (MIRU'94) 論文集, No.II (1994) pp.239-246
- 1.5 主动视觉
- [1] Y. Aloimonos and I. Weiss : Active vision, International Journal of Computer Vision Vol.1, No.4 (1988) pp.333-356
 - [2] R. Bajcsy : Active perception, IEEE Proceedings, Vol.76, No.8 (1988) pp.996-1006
 - [3] D. H. Ballard and C. M. Brown : Principles of animate vision, In Y. Aloimonos (ed.), Active Perception, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers (1993) pp.245-282
 - [4] K. Ikeuchi and M. Herbert : Task oriented vision,

- Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (1992) pp.2187-2194
- [5] Jan van der Spiegel, G. Kreider, C. Claeys, I. Debusschere, G. Sandini, P. Dario, F. Fantini, P. Belluti and G. Soncini: A foveated retina-like sensor using CCD technology, In C. Mead and M. Ismail (eds.), Analog VLSI Implementation of Neural Systems, chapter 8, Kluwer Academic Publishers, Boston (1989) pp.189-212
 - [6] 末松良一, 山田宏尚: 中心窩を有する新しい視覚センサの開発—広角高歪曲レンズの開発—, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.10 (1995) pp.1556-1563
 - [7] Y. Kuniyoshi, N. Kita, S. Rougeaux and T. Suehiro: Active Stereo Vision System with Foveated Wide Angle Lenses, Proceedings of 2nd Asian Conference of Computer Vision (ACCV 95) (1995) pp.359-363
 - [8] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman: Image-Based Homing, Proceedings of IEEE Robotics and Automation (1991) pp.910-915
 - [9] 八木康史, 川戸慎二郎: 円すいミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得, 信学論, Vol. J74-D2, No.1 (1991) pp.19-26
 - [10] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ Hyper-Omni Vision の提案, 信学論, Vol. J79-D2, No.5 (1996) pp.698-707
 - [11] 石黒浩: 注視に基づくロボットの視覚, 人工知能学会誌, Vol.10, No.4 (1995) pp.500-506
 - [12] 喜多伸之: 人間に学ぶアクティブ・ビジョン・システム, 情報処理, Vol.36, No.3 (1995) pp.264-272
 - [13] H. I. Christensen, K. W. Bowyer and H. Bunke (eds.): Active Robot Vision, World Scientific Publishing (1993)
 - [14] C. M. Brown: Gaze controls with interactions and delays, IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics, Vol.20, No.1 (1990) pp.518-527
 - [15] 喜多伸之, S. Rougeaux, 國吉康夫, 坂根茂幸: 仮想ホログラムを用いた実時間両眼追跡, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5 (1995) pp.683-690
 - [16] R. Milanese et al.: Integration of Bottom-Up and Top-Down Cues for Visual Attention Using Non-Linear Relaxation, Proceedings of CVPR '94 (1994) pp.781-785
 - [17] Y. Kuniyoshi and H. Inoue: Qualitative Recognition of Ongoing Human Action Sequences, Proc. of IJCAI'93 (1993) pp.1600-1609
 - [18] Y. Kuno, H. Numagami, M. Ishikawa, M. Hoshino and M. Kidode: Three-Dimensional Vision Techniques for an Advanced Robot System, Proceedings of 1st International Conference on Robotics and Automation (1985) pp.11-16
 - [19] R. J. Woodham: Refractance Map Techniques for Analyzing Surface Defects in Metal Casting, MIT AI-TR 457 (1978)
 - [20] Y. Shirai and M. Suwa: Recognition of Polyhedrons with a Range Finder, Proc. of 2nd IJCAI (1971) pp.80-87
 - [21] Katsushi Ikeuchi: Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.3, No.6 (1981) pp.661-669
 - [22] H. Takasaki: Moire topography, Applied Optics, Vol.9, Issue 6 (1970)
 - [23] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 (編): コンピュータビジョン—技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ (1998)
 - [24] 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990)
 - [25] 荒木和男: 高速三次元形状計測, 画像ラボ, Vol.2, No.7 (1991) pp.20-25
 - [26] 八木康史, 谷内田正彦: 実時間全方位視覚センサ, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42 (CVIM 3) (2001.12)
 - [27] 三浦純, 池内克史: 作業の目的を考慮した視覚認識戦略の生成, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.574-585
- ### 1.6 实时视觉
- [1] 溝口博: ロボットビジョン用イメージプロセッサ, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.2 (1992) pp.190-193
 - [2] 坂上, 木戸出: イメージプロセッサの最近の動向, 電子通信学会誌, Vol.69, No.1 (1984) pp.90-98
 - [3] H. Inoue and H. Mizoguchi: A Flexible Multi-Window Vision System for Robots, The Second International Symposium on Robotics Research, MIT Press (1985)
 - [4] 久保田, 福井, 石川, 溝口: 動物体の認識, 識別を目指したビジョンプロセッサの構想と試作モデルの開発, 信学技報, PRU 89-107 (Jan, 1990)
 - [5] 橋本英昭, 尾崎文夫, 佐藤広和, 溝口博: 風船お手玉ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.3 (1990) p.109
 - [6] E. D. Dickmanns et al.: Dynamic monocular machine vision, Machine Vision & Application, Vol.1 (1988) pp.223-240
 - [7] 岡田慧, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允: PC による高速対応点探索に基づくロボット搭載可能な実時間視差画像・フロー生成法と実現, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6 (2000) pp.138-143
 - [8] 森田俊彦, 沢崎直之, 内山隆, 佐藤雅彦: カラーラッキングビジョン, 第14回日本ロボット学会講演予稿集 (November, 1996) pp.279-280
 - [9] S. Muramatsu, Y. Kobayashi, M. Araoka, S. Naoi, T. Kaneta, K. Hirose and S. Onizawa: Image Processing LSI ISP-IV Based on Local Parallel Architecture and its Applications, IEEE Int. Conf. on Image Processing, Proc.III (1998) pp.1000-1004
 - [10] 藤田善弘, 山下信行, 岡崎信一郎: リアルタイムビジョンのための並列処理, LSI IMAP とそのシステム, Vol.13, No.3 (1995) pp.35-38
 - [11] K. Konolige: Small Vision Systems: Hardware and Implementation, Int. Symp. on Robotics Research (1997)
 - [12] 金出武雄, 木村茂: ビデオレート・ステレオマシン,

- 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3 (1995) pp.322-326
- [13] 佐々木繁, 塩原守人: 動画像処理プロセッサ ISH-TAR によるリアルタイム・オブティカル・フロー抽出, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3 (1995) pp.27-30
- [14] 石川正俊: 超並列・超高速ワンチップビジョンとその応用, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3 (1995) pp.31-34
- [15] E. Funatsu, Y. Nitta, Y. Miyake, T. Toyoda, J. Ohta and K. Kyuma: An artificial retina chip with current-mode focal plane image processing functions, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.44, No. 10 (1997) pp.1777-1782
- [16] 井上博允: リアルタイムビジョンとその応用, 日本ロボット学会, Vol.13, No.3 (1995) pp.2-6
- 1.7 机器视觉在生产技术中的应用**
- [1] 坂上勝彦, 奥水大和: 街に出るマシンビジョン, 電気学会論文誌 (C), Vol.117, No.10 (1997) pp. 1339-1344
- [2] 江尻正員編: 画像処理産業応用総覧 (上下巻), フジテクノシステム (1994)
- [3] 奥水大和監修: 目視検査の自動化技術, テクノシステム (1995)
- [4] 製品のライフサイクルにおける感性・官能評価システムの開発に関する研究成果報告書 (普及版), (財) 国際ロボット・エフ・エー技術センター, IMS センター, IMS 9619 (1997. 3)
- [5] 奥水大和, 坂上勝彦: 画像処理検査技術の今後の趨勢—街に出るマシンビジョン—, 画像ラボ, No.100 (1998. 4)
- [6] 奥水大和: 総論—マシンビジョンの最近の動向, OplusE, No.181 (1994. 12) pp.70-80
- [7] 奥水大和: 生産における映像情報メディア試論, 映像情報メディア学会, Vol.52, No.5 (1998. 5) pp. 101-106
- [8] 奥水大和, 秦清治: 画像処理の新産業応用を展望する, 電気学会論文誌 (C) (新画像処理産業応用特集), Vol.119-D, No.1 (1999) pp.2-7
- [9] 奥水大和, 栗田多喜夫, 加藤邦人, 長田典子, 坂上勝彦, 山本和彦: マシンビジョンの実利用を促進するための技術展望, 電気学会論文誌 (C), Vol.123-C, No.3 (2004) pp.1-12

第2章 语音信息处理

谋求与人类交流的机器人正在不断增加。在这种机器人中,语音界面是不可或缺的,因此目前正在开展多项面向机器人的语音应用研究的课题。

与机器人语音会话系统相关的基本技术涉及许多个学科,本节重点对它的基础技术——语音识别和语音合成进行概述,然后针对应用系统做一些介绍。

2.1 语音识别

2.1.1 语音识别装置的分类

所谓语音识别,就是对发出的语音进行处理,将其转换成单词或单词序列的工作。

语音识别装置有两类:在每次发话时,从系统的原有词汇中找出某个单词进行发话的称为单词语音识别装置;在每次发话时,以单词序列进行发话的系统称为连续语音识别装置。也就是说,单词语音识别装置每次发话时仅将一个单词作为识别结果输出,而连续语音识别装置每次发话时将单词序列作为识别结果输出。

目前,制造厂家正在开发的会话机器人多数采用单词语音识别装置^[16~18]。至于连续语音识别,又可以进一步分为网络文法识别、概率文法(统计语音模型)识别两类。网络文法利用有限状态自动机将受理的单词序列以句子的形式硬性记述下来;概率文法则不同,它可以受理词汇内的任何单词序列。例如,信息处理振兴协会(IPA)提供的免费软件Julian^[1]就是基于网络文法的连续语音识别系统,而另一个软件Julius^[2]则是基于概率文法的连续语音识别系统。供研究用的会话机器人多数采用网络文法^[19~21],不过近来也出现了采用概率文法的机器人^[22]。如果机器人与使用者之间以固定表现形式进行语言信息交换,那么单词识别就已经能够做到充分应付了,但是随着表现形式变得复杂,就必须借助于网络文法或概率文法了。一般来说,网络

文法可以受理的表现形式比较固定,而概率文法连续语音识别系统可以受理表现自由度较高的文章。

2.1.2 语音识别系统的构成

语音识别系统的构成如图2.1所示。

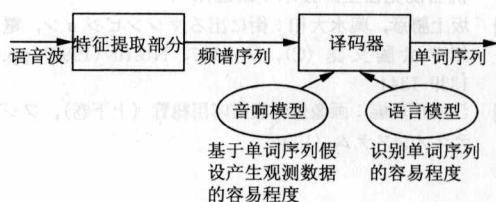


图2.1 语音识别系统的构成

在特征提取部分,通常每隔5~10ms,求取20~30ms窗幅的短时间频谱,然后以特征向量序列的形式输出。图2.2是单词“こんにちは”(日语,“你好”的意思。)的频谱图举例。特征提取的详细内容将在本篇2.1.3节中进行介绍。

在如上获得的特征参数序列中,译码器求出最适合的单词,或者单词序列。即若设特征向量序列为 $X(=x_1 x_2 x_3 \cdots x_T)$ (x_i 为特征向量, T 为时间序列的长度),设单词序列为 $W(=w_1 w_2 w_3 \cdots w_K)$ (w_i 为单词, K 为单词数),求出满足下式的 W :

$$\operatorname{argmax}_w \log \Pr(W|X) \quad (2.1)$$

式中, $\operatorname{argmax}_i f(i)$ 的意义是求给出 $f(i)$ 的最大值所对应的 i 。直接计算式(2.1)的概率模型是无法事先建立的。因此,要利用贝叶斯公式把式(2.1)变换成下列形式:

$$\operatorname{argmax}_w (\log \Pr(X|W) + \log \Pr(W)) \quad (2.2)$$

并计算对数似然。式(2.2)中的第一项是单词或单词序列 W 发话时,音响现象 X 产生的概率。计算中用到的概率模型称为音响模型。音响模型的详细内容将在2.1.4节中进行介绍。式(2.2)中的第二项是与单词或单

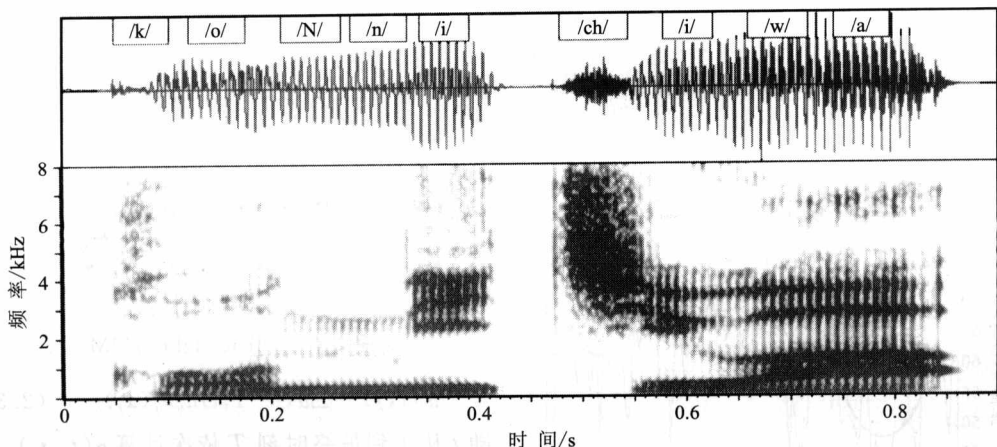


图 2.2 单词语音“こんにちは”的频谱图

词序列 W 的发生有关的先验概率,在单词识别的场合,它就是与词汇的发生有关的先验概率,而在连续语音识别的场合,它则是单词序列 W 能否成为句子的评价标准。如果不能被视为句子的单词序列,那么其取值会比较小;如果能被视为句子的单词序列,则其取值比较大;如果是属于频繁出现的单词序列,其取值将更大。在上述计算中采用的概率模型,称为语言模型。语言模型的详细内容将在 2.1.5 节中进行介绍。至于译码器的详细内容将在 2.1.6 节中进行介绍。

2.1.3 语音的特征提取

语音特征通过短时间频谱分析进行求解。一般来说,对数频谱的包络成分表示音韵信息,细微的构造表示韵律信息。因为用对数频谱的傅里叶逆变换表示的对数倒频谱低阶项与对数频谱的包络成分是等价的,所以常常采用对数倒频谱在低阶的十几个参数来表示语音识别的特征量。在图 2.3 和图 2.4 中,分别表示语音 /a/ 的波形和对数功率谱。

表现频谱时,还可以把频率轴变换成迈耳尺度^[3]。所谓迈耳尺度,就是让声音高低的分辨率符合人类心理听觉特性的一种尺度。例如,人类听觉上感觉声音是两倍的,在迈耳频率轴上也取得两倍的数值。现在绝大多数部门采用的参数,相当于迈耳频率轴上的对数倒频谱,被称为 MFCC(Mel Frequency Cepstrum Coefficients)。

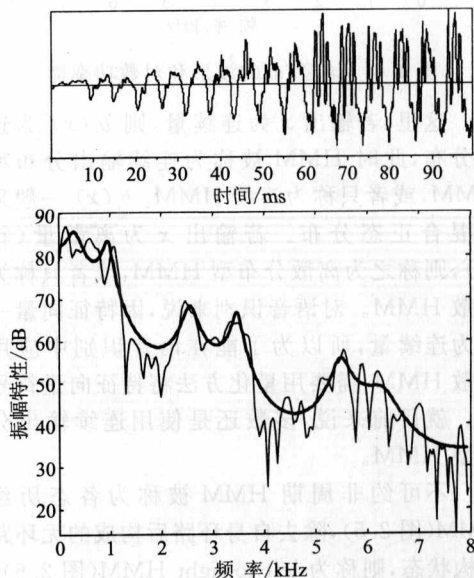


图 2.3 语音/a/的波形和对数功率谱

2.1.4 音响模型

音响模型(acoustic model)表示音响现象 X 发生概率的程度。目前,最通用的音响模型是隐式马尔可夫模型(HMM: Hidden Markov Model)^[12,13]。HMM 由四组分量组成 $M = \{\Pi, A, B, F\}$, 它们分别是初始状态概率 $\Pi = \{\pi_i\}$ (π_i 是初始状态中的状态 i 的概率)、状态转移概率 $A = \{a_{ij}\}$ (a_{ij} 是从状态 i 到状态 j 的转移概率)、输出概率 $B = \{b_i(x)\}$ ($b_i(x)$ 是对于状态 i , x 是被输出的概率)、最终状态的集合 $F = \{f_i\}$ 。

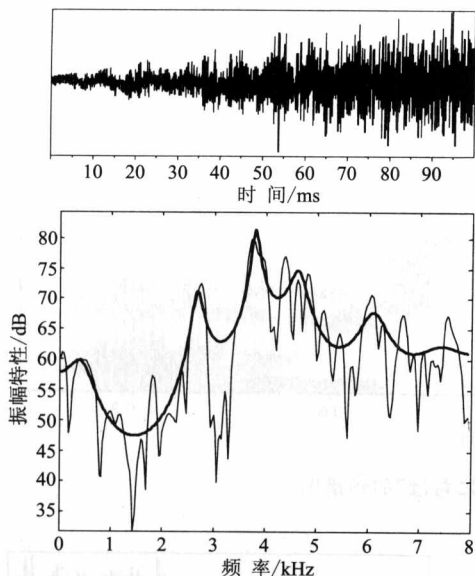


图 2.4 语音/s/的波形和对数功率谱

这里,若输出 x 为连续量,则 $b_i(x)$ 为连续分布,此时 HMM 被称为连续输出分布型 HMM,或者只称为连续 HMM。 $b_i(x)$ 一般采用混合正态分布。若输出 x 为离散量(符号),则称之为离散分布型 HMM,或者只称为离散 HMM。对语音识别来说,因特征向量一般为连续量,所以为了能在语音识别中应用离散 HMM,需要量化方法将特征向量符号化。就目前来说,多数还是使用连续输出分布型 HMM。

不可约非周期 HMM 被称为各态历经 HMM(图 2.5),除去自身环路后构成的无环路结构状态,则称为 left-to-right HMM(图 2.6)。语音中经常用到 left-to-right HMM。

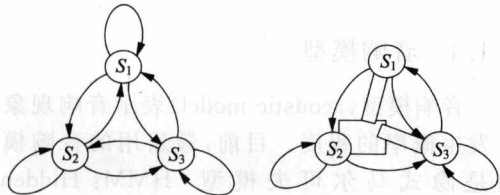


图 2.5 各态历经 HMM

当 HMM 中的 M 和输出数据列 X 给定后,可以采用前向算法(forward algorithm)求解 $\Pr(X|M)$ 。在前向算法中,设直至时刻 t 输出从 x_1 到 x_t ,到达状态 j 的概率为 $\alpha(t, j)$,则有

$$\alpha(0, j) = \pi_j$$

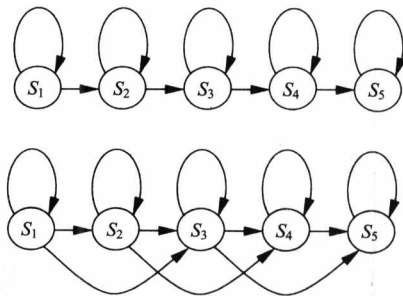


图 2.6 left-to-right HMM

$$\alpha(t, j) = \sum_i \alpha(t-1, i) a_{ij} b_j(x_j) \quad (2.3)$$

随 t 从 1 到最终时刻 T 依次计算 $\alpha(t, \cdot)$, 则 $\Pr(X|M)$ 可以按照下式求出:

$$\Pr(X|M) = \sum_{i \in F} \alpha(T, i) \quad (2.4)$$

在单词语音识别中,建立每个单词 w 的模型 M_w ,有

$$\arg \max_w \Pr(X|M_w) \Pr(w) \quad (2.5)$$

设 w 为识别结果。 $\Pr(w)$ 是关于 w 发生的先验概率。

输出 X 时求解最高概率状态列的算法有维特比算法(Viterbi decoding algorithm)。在该算法中,如果是属于单独路径,设在时刻 t 前输出 x_1 到 x_t ,到达状态 j 的最高概率为 $\alpha(t, j)$,则有

$$\begin{aligned} \alpha(0, j) &= \pi_j \\ \alpha(t, j) &= \max_i \alpha(t-1, i) a_{ij} b_j(x_j) \end{aligned} \quad (2.6)$$

这时,若设最佳路径的反向指针 $\text{ptr}(t, j)$ 为

$$\text{ptr}(t, j) = \arg \max_i \alpha(t-1, i) a_{ij} b_j(x_j) \quad (2.7)$$

则从时刻 T 的 $\alpha(T, j)$ 的最佳值,逐步求解 $\text{ptr}(t, j)$, 就可以得到输出 x_1 到 x_T 的最佳状态列向量。

此外,还有一种从学习数据求模型参数的算法,叫做鲍细韦尔的再估计算法(Baum-Welch re-estimation algorithm)^[4]。

Left-to-right HMM 属于随时间推移某几个定常状态之间彼此转换的模型,因此它是表示区分语音的稳定过程的概率模型。原则上说,用它作为区分语音的稳定过程并不大合理,所以现在人们正在研究各种其他概率模型,以便能描述更加复杂的现象。

2.1.5 语言模型

在识别连续语音时,有必要要求出关于单

词序列 W 发生的先验概率。为此所采用的模型就是语言模型(language model)。一般来说,若 W 的单词序列长度为 K , 单词序列 W 的输出概率可以用下列公式求出:

$$\Pr(W) = \prod_{k=1}^K \Pr(w_k | w_{k-1}, w_{k-2}, \dots, w_1) \quad (2.8)$$

这里,不可能针对所有可能的单词部分序列求出下一个单词的发生概率,所以需要近似处理。用式(2.9)中的 $N-1$ 阶马尔可夫模型对式(2.8)进行近似,得到的语言模型被称为 N -gram 语言模型。

$$\Pr(W) = \prod_{k=1}^K \Pr(w_k | w_{k-1}, w_{k-2}, \dots, w_{k-N}) \quad (2.9)$$

在多数情况下, N 值取 2 或 3。 $N=2$ 时,称为二元文法语言模型(bi-gram language model); $N=3$ 时,称为三元文法语言模型(tri-gram language model)。

语言模型利用新闻报道汇编等为蓝本文集进行学习。不过学习文集中提供的未必全都是所需的 3 单词词组。为此,将未出现的三语法用双语法的常数倍来近似。这时,如何确定常数是一个问题,通常的办法是确定分配给双语法表示的单词全体的概率,然后按照双语法的比例来分配概率。这种方式称为补偿(back off)^[5],它可以进一步解释为将未出现的双语法补偿到单语法中。

2.1.6 译码器

译码器是利用音响模型和语言模型,针对给定的发声求解最佳单词序列 W 的工具。

$$\arg\max_w \Pr(X|W)\Pr(W) \quad (2.10)$$

有两种译码算法:仅对数据序列搜索一次的一次通过算法和搜索数次的多次通过算法。

双语法的一次通过算法比较容易做。针对全部词汇,进行从单词到单词的转换,在从前一个单词 w_p 向后一个单词 w_s 的转移过程中给出双语法 $\Pr(w_s | w_p)$ 。针对上述过程形成的巨大的网络进行搜索(例如,应用维特比算法(Viterbi algorithm)),就能求出最佳单词序列。

在二阶段(two pass)三语法译码器中,第一阶段(one pass)用二元文法(bigram)进行译码。这时的做法与通常的维特比算法有所不同

同,即在设定反向指针的时候,不仅给出最佳值,还把指针扩展到所有满足优良记录的状态。在这里,由于从最终状态开始搜索反向指针,所以可以绘出单词图。在二阶段中,针对单词图上的单词序列,应用三元文法语言模型,重新计算单词序列的发生概率。

2.1.7 噪声的消除

机器人工作时需要在实际环境中进行识别,因此噪声的消除成为一个重要问题。

消除噪声最为常用的方法是所谓的频谱相减(spectral subtraction)法^[6]。频谱相减法首先估计无语音混入的区间,然后求取背景噪声的功率谱 n ,再从掺杂噪声的功率谱 x 中减去 n ,结果就能估计出无噪声功率谱 s 。这种方法虽然非常简单,但效果不错,所以被许多系统采用。谱减(Spectral Subtraction)法有多种公式,例如,下列公式就经常被采用:

$$s_i = \begin{cases} x_i - \alpha n_i, & \text{当 } x_i - \alpha n_i < \beta x_i \\ \beta x_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (2.11)$$

式中,角标 i 为频谱的频段; α 为常数,称为增强系数,通常采用大于 1 的值; β 为基底系数,也是常数,通常的取值范围为 $0 < \beta < 1$ 。

在噪声条件下,也有办法计算出音响模型分布变形的程度。假设在对数频谱范围内,噪声的分布及无噪声环境下音响模型的分布都呈现正态分布,并假设各个平均值向量和协方差矩阵分别为 $\mu_N', \Sigma_N', \mu_S', \Sigma_S'$ 。这时,线性频谱范围的分布呈现对数正态分布,其平均值和协方差矩阵 $\mu_N, \Sigma_N, \mu_S, \Sigma_S$,可以由下式求出:

$$\mu_{*,i} = \exp \mu_{*,i}' + \frac{(\sigma_{*,i}')^2}{2} \quad (2.12)$$

$$(\sigma_{*,ij})^2 = \mu_{*,i} \mu_{*,j} \exp[(\sigma_{*,ij}')^2 - 1] \quad (2.13)$$

式中, $*$ 为 N 或 S ; μ_i 为 μ 的第 i 个元素; σ_{ij} 为 Σ 的第 ij 个元素。在线性范围内噪声相加,将分布合成,噪声下语音分布的平均值和协方差矩阵 μ_X, Σ_X 可以用下列形式给出:

$$\mu_X = \mu_N + \mu_S \quad (2.14)$$

$$\Sigma_X = \Sigma_N + \Sigma_S \quad (2.15)$$

合成后的分布虽然不是对数正态分布,但是可以将其看作是对数正态分布。假设它回到对数频谱范围的分布状态,那么在噪声下的语音对数频谱范围的分布参数 μ_X', Σ_X' 可以从下式求解:

$$\mu_{xi}^l = \ln \mu_{xi} - \frac{\ln \sigma_{xii} / \mu_{xi}^2 + 1}{2} \quad (2.16)$$

$$\sigma_{xij}^l = \ln \left(\frac{\sigma_{xij}}{\mu_{xi} \mu_{xj}} \right) + 1 \quad (2.17)$$

基于这种方法的噪声对策称为 PMC (Parallel Model Combination, 并行模型联合)^[7]。将分布从合成后的线性频谱范围向对数频谱范围变换的过程中,虽然 PMC 被近似,但它仍不失为一种噪声环境的有效补偿方法。

2.1.8 对说话者的适应

众所周知,语音中存在着个人差异。如果打算构建识别非特定人群的音响模型,那么分布将变得很宽,识别率随之下降。为了减少这种影响,人们以少量的特定说话者的数据和非特定说话者,或者标准说话者的音响模型为基础,制作了比上述特定说话者更合适的音响模型。这种处理被称为对说话者的适应,典型的适应说话者的方法有 MAP 适应法^[8]、MLLR^[9]、Eigen Voice^[10]等方法。

MAP(Maximum A Posterior)适应法是在对参数进行估计时,采用参数先验分布的一种方法。假设模型参数为 M ,说话者 k 的学习数据为 X ,求使下式达到最大化的参数 M :

$$\arg\max_M \Pr(M|X) = \arg\max_M \Pr(X|M) \cdot \Pr(M) \quad (2.18)$$

式中, $\Pr(M)$ 为模型参数的先验分布。

在 MLLR(Maximum Likelihood Estimation of Linear Regressive Coefficients)方法中,说话者 k 的第 i 次的分布平均值向量 μ_{ki} 是将标准说话者的第 i 次分布平均值向量 μ_{ci} 用下式变换后得到的:

$$\mu_{ki} = A_k \mu_{ci} + b_k \quad (2.19)$$

为了满足适应,从说话者 k 的少量适应数据,极大似然地估计出说话者 k 用的线性变换参数 A_k, b_k 。

Eigen Voice 方法中,首先针对每个人排列各平均值向量,列写平均值向量的集合向量 m ,然后利用主分量分析求出基底为向量 v_i 。设使 v_i 持有第 i 列向量的矩阵为 V ,利用赋予每个人的加权向量 a_k ,通过下式:

$$m_k = V a_k \quad (2.20)$$

可以求出说话者 k 的平均值向量的集合向量

m_k 。为了能做到适应,利用说话者 k 用的适应数据,极大似然地估计出说话者 k 用的加权 a_k 。

在 MAP 适应方法中,适应的只是给定的学习数据的分布(如果适应的数据只是/a/,那么就只有/a/的分布是被适应的)。与此相反,在 MLLR 和 Eigen Voice 方法中,在特征参数空间内,特定说话者的数据所占据的部分空间被模型化,所以用少量的学习数据就能适应较多的分布(即使只给出/a/的数据,也能适应其他音素的分布)。

2.1.9 远距离发话者的语音识别

在通常的语音识别中,都是用所谓的受话话筒(即靠近嘴边的话筒)接收语音并对其实施处理的。在这种条件下噪声和放射特性的影响都比较小,可以认为对象具有比较均匀的数据。在机器人语音识别的场合,让用户携带话筒的现象同样很普遍。不过,在机器人应用的场合,让用户携带着话筒实际上是不自然的,所以人们正在探讨让机器人一方设置话筒进行识别的方案。在这种状况下的语音识别被称为远距离发话者的语音识别(distant talk speech recognition),或者称为免提语音识别(hands free speech recognition)。

最常用的一个方法是安排多个话筒,让话筒对准发话者方向的波束成形(beam forming),另一种是把零位对准噪声源方向的零位操纵(null steering)方法。在波束成形方法中,由于声音到来的方向不同,需要对到达各个话筒的时间差异进行补偿,典型的做法是将各个话筒的输入相加求出延迟和(delay and sum)^[12]。在零位操纵方法中,输出用各个话筒的加权和表示,在将期望方向(说话者方向)的增益固定后,典型的做法是根据输入最小化决定权重(DCMP: Direction Constrained Minimum Power)。近年来,也有人在研究所谓的独立分量分析法(ICA: Independent Component Analysis)。

小林哲则

2.2 语音合成

凡是用人工方法进行发声,均称之为语音合成。一般来说,人类的发声无法直接应用。在本节中,首先就理解语音合成所必需的语音特征做简要的介绍;其次,介绍语音合

成方式的分类;最后,针对目前应用广泛且最具活力的研究课题“源于文本的语音合成(TTS:Text-To-Speech)”,概略地讲解它的模块组成和语音合成技术。

2.2.1 语音的特征

语音特征有分段特征(segmental features)和韵律特征(prosodic features)两个方面。前者代表语音各自的音韵性,后者则代表语调、重音、音韵等赋予语音整体特征的内容。

粗略地对音韵性进行分类,可以将其区分为母音和子音两类。音韵性是由舌、唇等发音器官(图2.7(a))形成空气振动,让气流沿着口腔和鼻腔(称为声道)传播时被调制的。母音和子音的主要区别在音源。母音的音源是利用声带的振动,使来自肺部的空气流受到周期性阻断而形成的,从语音波形能观察到明显的周期性(图2.8(a))。子音的音源是从口腔内的狭缝中发生的空气紊流,它不存在周期性。至于韵律特性,语调靠声带的振动数(称为基本频率)来决定,重音靠音源的强度决定,而音韵则由发音器官的动作速度来决定。

2.2.2 语音信号的模型化

初期语音合成研究是从发声器官的建模,考察语音生成的过程开始的。如图2.7(b)所示,沿口腔上的若干点处,截取横断面,再将横断面连接起来形成一条反映截面变化的管道,近似成如图2.7(c)所示的音响管。所谓语音的模型化,就是让声波沿着音响管道传播,最后变成声波输出。从20世纪50年代初期到60年代中期,模型化大大推进了语音合成的研究^[1,2]。人们了解到,语音的音韵性可以由图2.8(b)中表示的语音频谱来决定,特别是语音频谱的峰值(称为共振峰频率)起到重要的作用。人们提出用电路近似音响管传递特性的方法(声道模拟语音合成方式)、模拟音响管的共振特性的方法(在终端模拟语音合成的方式,又称为共振峰合成方式)等^[3,4]来解释语音合成的机理。除音响管外,20世纪60年代中期,人们还从数字信号处理的角度提出估计如图2.7(d)所示声道传递特性的算法。其中有线性预测分析合成方法,它把语音信号看作是数学概率过程,给出了处理的公式^[5],还有基于准同构分析的

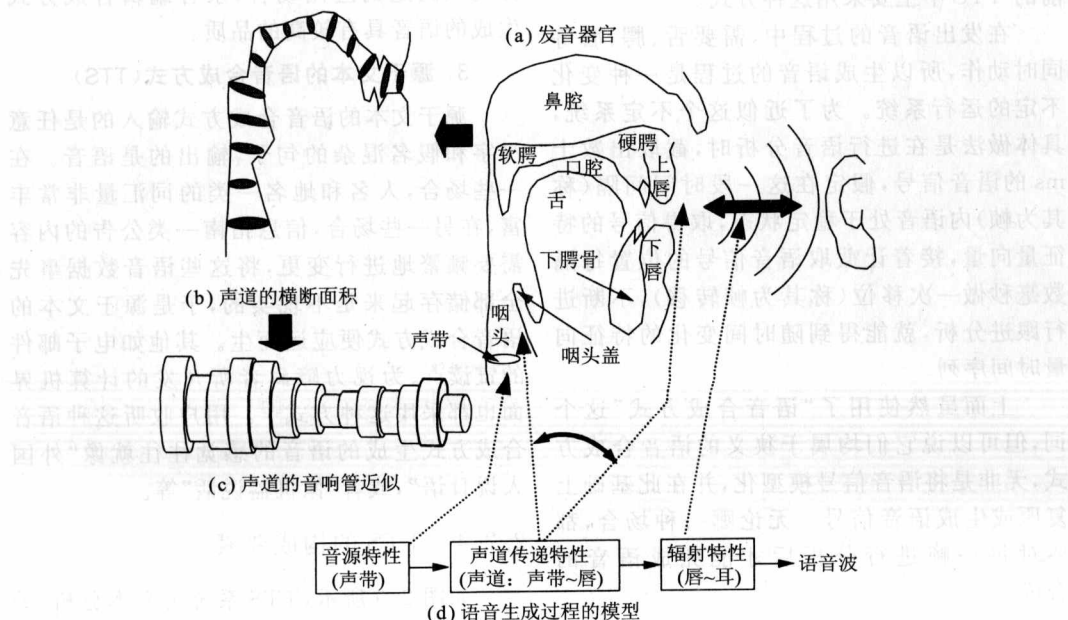


图 2.7 发音器官与模型

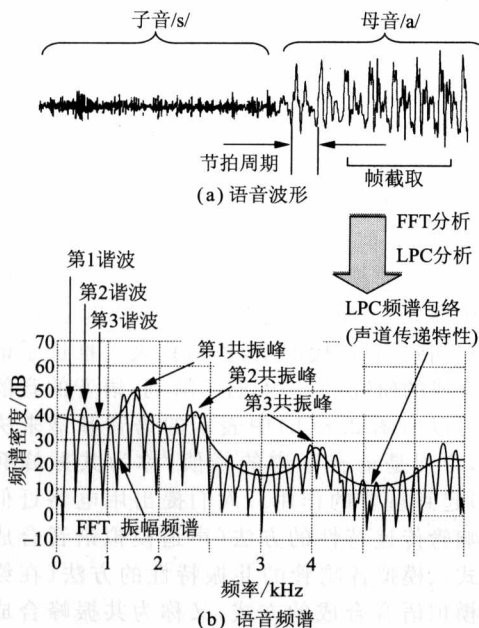


图 2.8 语音信号的物理特征

语音合成方式,它从系统辨识的角度给出了处理公式^[6]。20 世纪 90 年代后,在波形范围内的处理方式^[7]诞生,频谱分析方法不再盛行。这种方式虽然需要大量的存储量,但突出的优点是能改善合成语音的品质,因此目前的 TTS 中主要采用这种方式。

在发出语音的过程中,需要舌、腭、唇等同时动作,所以生成语音的过程是一种变化不定的运行系统。为了近似这个不定系统,具体做法是在进行语音分析时,截取出数十 ms 的语音信号,假定在这一段时间间隔(称其为帧)内语音处于稳定状态,取得信号的特征量向量,接着让截取语音信号的位置每隔数毫秒做一次移位(称其为帧转移),不断进行跟进分析,就能得到随时间变化的特征向量时间序列。

上面虽然使用了“语音合成方式”这个词,但可以说它们均属于狭义的语音合成方式,无非是将语音信号模型化,并在此基础上复原或生成语音信号。无论哪一种场合,都要对每一帧进行分析后才能完成语音的合成。

2.2.3 语音合成的分类

在日常生活中,“语音合成”这个词使用得相当广泛。它的主要应用方式可以分类

如下:

1. 分析合成方式

分析合成方式是指先分析人类的语音,再反过来将其复原成语音信号的方式,它只能用固定的词汇合成。语音分析的方法采用线性预测分析^[8]等。该方式的优点在于数据被压缩,不过不可避免地会伴生声音品质变差的问题,结果使声音听起来会感觉是“略带鼻音”。现在固体存储器的价格已经十分便宜了,高品质的语音成为优先考虑的指标,因此不将语音信号压缩而直接存储的方式逐渐成为主流,而分析合成方式的应用事例正在减少。

2. 录音编辑合成方式

录音编辑合成方式先把人们的话语“录音”,然后把“录音”的语音加以“编辑”修正,生成语音。录音的语音长度通常比“句子”短,属于单词和词组的形式。例如,事先录制好“在 2 号线”、“10 点发车”、“开往名古屋”、“请上车”等词组。将它们编辑和修正后便生成了语音。虽然只有“录音”的语音能够再生,但是通过改变“录音”语音再生的顺序,仍然可以生成内容略有变化的语音。在工作任务比较固定的应用场合,录音编辑合成方式生成的语音具有较高的品质。

3. 源于文本的语音合成方式(TTS)

源于文本的语音合成方式输入的是任意汉字和假名混杂的句子,输出的是语音。在一些场合,人名和地名一类的词汇量非常丰富,在另一些场合,信息指南一类公告的内容需要频繁地进行变更,将这些语音数据事先全部储存起来是不现实的,于是源于文本的语音合成方式便应运而生。其他如电子邮件的宣读^[8]、为视力障碍者所开发的计算机界面也都采用这种方式^[9]。用户收听这种语音合成方式生成的语音的感觉往往就像“外国人说日语”,或者“像机器说话”等。

2.2.4 TTS 的构成要素

如图 2.9 所示,TTS 系统由文本分析、韵律生成、语音合成单元、合成单元选择、语音信号处理等模块构成。文本分析模块的作用是辨别构成句子的单词,在读出时赋予重音等。韵律生成模块的功能是生成整句的音

调。更具体地说就是设定每个音素持续时间的长度、强度、停顿位置、语音基本频率(高度)的时间模式等。

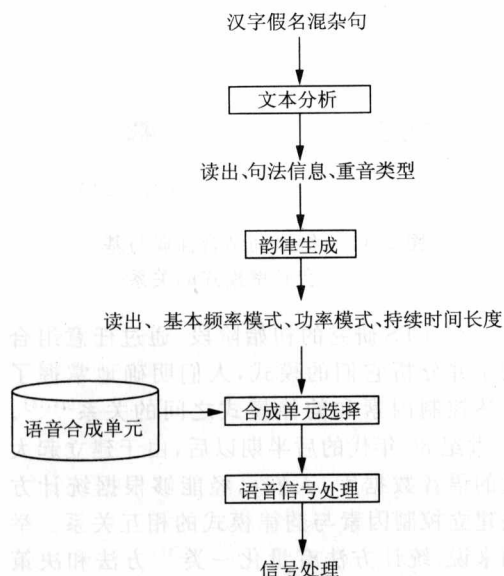


图 2.9 源于文本的语音合成系统模块构成

文本分析模块的任务是进行符号电平处理,而从韵律生成模块往后则进行与语音物理现象相关的处理。所谓语音合成单元,就是音素和音节等长度比较短的语音数据。目前,在主流的 TTS 方式中,这些合成单元多数被存储下来,再通过将它们进行适当的连接,就能合成任意语音。合成单元选择模块的功能是从预先存储的合成单元中挑选出那些符合期望合成音韵序列的合成单元。合成单元模块是人类发出的语音数据,所以具有人类发声时固有的声音高度和长度特征。韵律生成模块所生成的这些值与特征值还存在一定的差异。因此,语音信号处理模块将对声音的强度和长度进行调整。下面针对各个模块进行说明。

2.2.5 文本分析

1. 概述

文本分析主要处理下列一些内容^[10]:

- ① 对构成句子的单词进行辨别(例如,日本语言学→日本/语言学→日本语言/学);
- ② 在词类信息的基础上,估计构造关系,如修饰和被修饰关系等;
- ③ 决定助词的读出(例如,は→わ,へ→

え);

- ④ 长音化(例如,映画 えいが→え→が);

- ⑤ 连浊化(例如,目覚ましい時計 とけい→どけい);

- ⑥ 元音无声化(例如,アシカ/ashika/→/ashka);

- ⑦ 符号读出(例如,%→パーセント,\$→ドル);

- ⑧ 助数词读出(例如,1本→いっぽん,2本→にほん);

- ⑨ 重音类型的设定;

- ⑩ 重音结合的处理(例如,お'んせい+ご'うせい→おんせいご'うせい)。

2. 重音处理

重音类型的处理在传递意义时是很重要的。日语的重音对每个单词来说是固定的,一旦组成词汇时则需要随具体情况而定。例如,“桥”和“箸”这两个同音异义词,就得依靠重音加以区分,即两者语音的识别要看声音高度急剧下降点(重音点)所处的位置。如果用“'”表示重音点的位置,前面的两个单词有不同的发音方式,如“はし'を(渡る)”、“は'しを(もつ)”。

短语和句子发声时,由于单词要与附属词相结合,或者与其他单词组合成复合词,因此重音的位置会发生改变。例如,帰る(か'える)+ない=かえら'ない,是单词与助动词结合的例子,此时动词的重音发生了变化。这样的重音变化对理解合成语音发话的内容是至关重要的,对高度自然性的合成语音生成是不可缺少的。这些规则在 TTS 研究的初始阶段都已经被精心地研究过^[11]。

2.2.6 韵律生成

这里我们要特别地对基音频率进行说明。至于持续时间长度,请读者参见文献^{[12],[13]}。

1. 基音频率模式模型

图 2.10(a)给出了一个语句音调的例子,它表示人们说“今年度の日本の貿易の收支は”时发出的语音的基音频率模式。由图 2.10(a)可以清楚地看出,语音的基音频率在重点位置上出现陡然下降。也就是说,可

以认为重音类型是能够靠基音频率来实现的。由于肺部呼出气压的关系,语句的开头部分声音频率会比较高,但是在语句停顿之前,或者沿语句末尾的方向,声音会出现渐渐变低的倾向(称为语调成分)。

下面介绍两种具有代表性的模型:第一种模型用直线近似语调分量,把对应于2.2.5节中介绍的重音类型的重音分量叠加到语调成分上得到的一种“帽状模式模型”(图2.10(b)^[14]);第二种模型的特征是采用临界阻尼二阶线性系统的响应^[15]。正如图2.10(c)中表示的,它把语调分量近似为对应于脉冲状短语指令的响应,把重音型模式近似为阶跃状重音指令,并把两者叠加在一起。

2. 韵律控制规则

所谓韵律控制规则是指在文本分析中得到的信息(控制因素)的基础上设定韵律模型参数。例如,在基频模式场合,接续关系结构不同,重音分量和重音指令的强度是不同的。也就是说,如果与毗连短语的结合比较强(图2.11),后续重音句的强度就受到压抑,变成如同一个重音句似的模式。反之,如果结合比较弱,则后续重音句与先行重音句的强度

大致相同,结果使重音句的独立性得以维持^[14]。

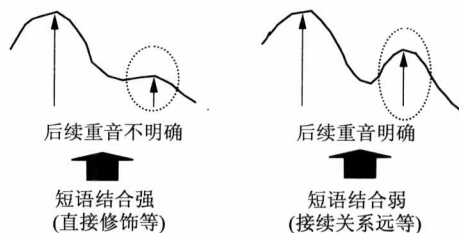


图 2.11 短语间结合强弱与基音频率模式的关系

在TTS研究的初始阶段,通过任意组合句子并分析它们的模式,人们明确地掌握了上述控制因素和韵律模式之间的关系^[14,16]。20世纪80年代的后半期以后,由于建立起大量的语音数据库,人们已经能够根据统计方法建立控制因素与韵律模式的相互关系。举例来说,统计方法有量化一类^[17]方法和决策树^[18]方法等。所谓量化一类方法,就是基于对因素的定性说明,进行目标变量定量建模的方法,其具体公式如下^[19]:

$$\hat{y}_i = \bar{y} + \sum_f \sum_c X_{fc} \delta_{fc}(i) \quad (2.21)$$

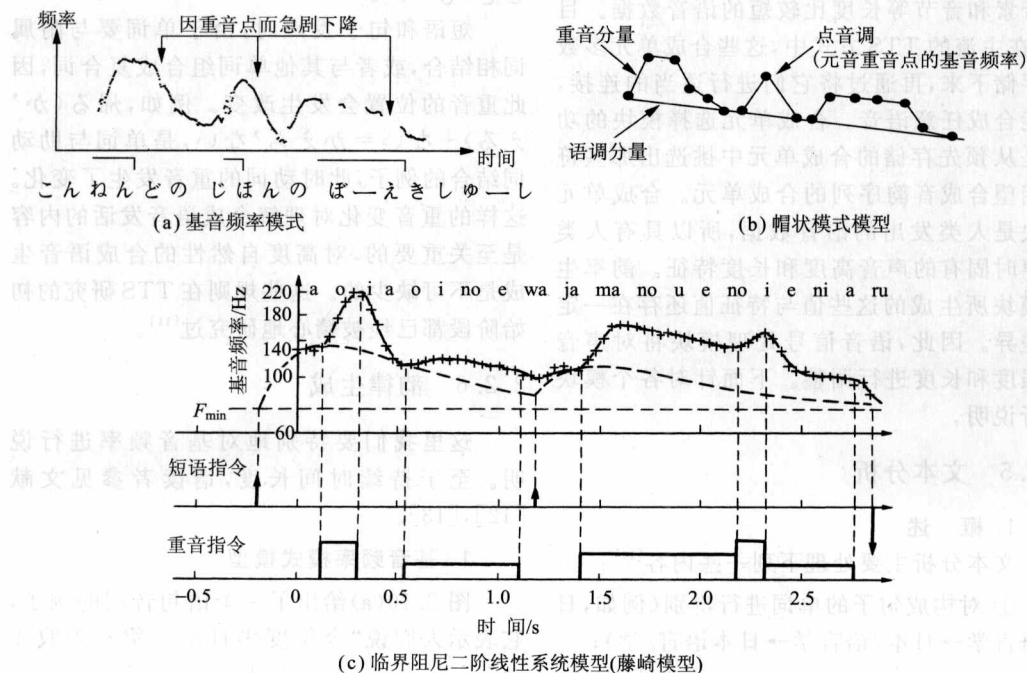


图 2.10 基音频率模式的模型

式中, \hat{y}_i 为第 i 次采样的估计值; \bar{y} 为全部学习数据的平均值, $\delta_{fc}(i)$ 由下式定义:

$$\delta_{fc}(i) = \begin{cases} 1, & \text{对应类型 } C \text{ 的系数 } F \text{ 的情况} \\ 0, & \text{对应上述情况以外的情况} \end{cases} \quad (2.22)$$

X_{fc} 是使下列值达到最小时求得的数值:

$$(\hat{y}_i - y)^2 \quad (2.23)$$

例如, 将重音句的大小视为定量变量, 将先行/后续边界的类别、重音类型、重音句内的音节数等视为定性说明的因素来建立控制规则。

2.2.7 语音合成单元

至今已经有许多合成单元的方案被公布。一般可以认为, 合成单元的数量越多, 合成的语音品质便越高。但是, 万全的方式是没有的。构筑 TTS 时, 应该在考虑音质、用途、开发成本和运行机器的规格等因素之后采取最适当的方式, 因此事先了解各种合成单元的优缺点很重要。

1. 应该考虑的因素

应该考虑的因素中最重要的因素是发音合成。所谓发音合成, 就是由于前后出现的音韵类别的不同, 造成音韵的物理特征不同的现象。试比较 /mama/、/sasa/ 的发声, 我们能够感觉到在 /m/ 和 /s/ 发声时舌头的位置是完全不同的。因此, 尽管音韵都是元音 /a/, 但是受到前、后位置是 /m/ 或 /s/ (音韵环境) 的影响, 口腔形状随时间的变化而出现差别, 结果影响到 /a/ 的音响特征也随时间而发生改变。第二位的重要因素当数基音频率。从图 2.7(a) 中可以清楚地看出, 声道与声带是彼此连接在一起的, 声带引起基音频率变化时, 声道的特征自然而然地也会受到影响。因此, 即使是同样的音韵, 如果基音频率高低不同, 其特征也会不同。至于其他的因素, 可以设想, 感情的影响和个性的影响也是重要的。

2. 基于试探的合成单元

从 20 世纪 70 年代后半期到 80 年代, 人们综合语音学知识、语音信号知识、语音信号处理的限制条件等因素, 提出了各种语音合成单元方案。这些方案的基本点在于高度关注日语音节构造与辅音 (C: consonant)

和元音 (V: vowel) 的结合。例如, 保持元音与辅音之间的发音合成结合, 在元音稳定部分连接的 VCV 方式 (合成单元的数量约为 800 种)^[20]、同样是保持元音与辅音的发音合成结合但改成在辅音部分连接的 CVC 方式 (约有 1300 种类型)^[21]、让辅音到元音变化优先的 CV 方式 (约有 130 种类型)^[22]、将 CV 单元 (保持从辅音向元音变化) 与 VC 单元 (保持从元音向后续辅音变化) 结合而成的 CV/VC 方式 (约有 300 种类型) 以及考虑前后音韵环境的音素 (电话) 方式 (约有 15 000 种类型)^[23] 等。

3. 基于统计学习法的语音合成单元

从 20 世纪 80 年代后半期开始, 人们利用大量语音数据, 通过对语音信号物理特征量的统计处理, 产生了最佳语音合成单元的方法。在这种思路的方案中有一种 COC (Context Oriented Clustering) 方法^[24], 它的结构概略地表示在图 2.12 中。首先准备带音韵标记的语音数据, 然后针对每个标记将语音段 (片断) 进行分类, 设定初始级 (与标记种类相同)。其次, 针对每个初始级分割先行或后续标记的种类。在图 2.12 中分割了 /b/ 先行的级 (w_{11}) 与除 /b/ 以外先行的级 (w_{12})。在所有的初始级中, 针对所有的组合 (电平的种类, 以及所属电平的先行的或后续的组合) 进行分割, 从众多分割方案中选出分割后的群组内频谱方差最小的那个方案。重复这种分割, 就生成了基于物理量频谱方差的合成单元。后来, 人们将这种统计方法进一步发展, 又提出了利用 HMM 的方法^[25] 和以语音变形后的波形误差为基准的方法^[26] 等。

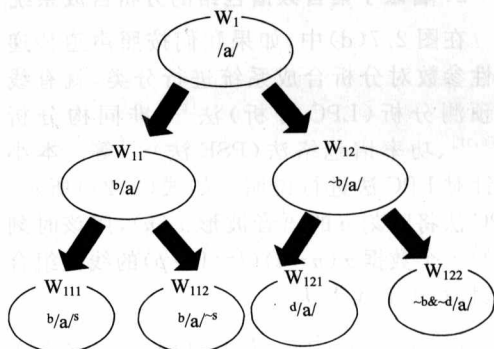


图 2.12 COC 方式

从20世纪80年代后半期开始,另一种方案,即对 non-uniform 合成单元的研究变得时髦起来^[27]。此前,语音合成单元仅用有限的元音和辅音组合(uniform)而成,与 non-uniform 合成单元方法的不同之处在于它利用各种各样的组合,不受试探知识的限制。实现这种思路的一种方法是语音资料库的语音合成方法^[28~30]。在语音资料库的语音合成中,要事先建立起为语音合成提供必要的附加信息的语音数据库(语音资料库),进行语音合成时,按照某些规范,从这个数据库中选择最适当的合成语句的合成单元。最终所选择的合成单元不一定是 uniform,而可能是 non-uniform。也可以说,最终使用什么样的合成单元,在系统构筑时并未确定。此前的系统是在假设合成单元可以利用的前提下构筑的,在这一点上现行系统有明显的不同。

2.2.8 语音信号处理

1. 语音信号处理方式的分类

可以根据三种观点对语音信号的处理方式进行分类:第一种观点是语音的分析合成方式。它主要有着眼于语音频谱包络的分析合成系统、着眼于语音谐波构造的分析合成系统、采用短时傅里叶变换的分析合成系统和在波形范围内进行处理的分析合成系统等。第二种观点是帧的设定。其中一种是以音节周期为基准设定帧进行语音分析的音节同步法,另一种是固定帧长,固定帧移位的分析法。第三种观点如图2.7(d)所示,按照是否分离成音源特性和声道传递特性来进行模型化划分。至今提出的方案基本上都可以看作是上述三种观点的组合。

2. 着眼于语音频谱包络的分析合成系统

在图2.7(d)中,如果我们按照声道传递特性参数对分析合成系统进行分类,就有线性预测分析(LPC分析法)^[5]、准同构分析法^[6,31]、功率谱包络法(PSE法)^[32]等。本小节针对LPC法进行说明。如式(2.24)所示,LPC法将时刻 n 的语音波形 $x(n)$,用该时刻前的 p 个数据 $x(n-i)$ ($i=1\sim p$)的线性组合预测,并用下式表达:

$$x(n) = \sum_{i=1}^p \alpha_i x(n-i) + e(n) \quad (2.24)$$

式中, α_i 为预测系数; $e(n)$ 为预测误差。

求帧内预测误差的平方和,为了让该值达到最小,对 α_i ($i=1\sim p$)求偏微分,然后对取值设定为0的 p 个联立一次方程式求解,即可求得预测系数。此外,还有局部自相关(PARCOR)分析法^[33]、线状谱对(LSP)分析法^[34]等,它们对提高合成滤波器的稳定性有一定作用。在图2.8(b)中,给出了对语音进行傅里叶变换得到的振幅频谱和利用LPC分析法得到的频谱的包络。由频谱包络可以清楚地看出,存在于振幅频谱中的细微构造被除掉,只呈现出频谱粗略的波形。

在基于语音频谱包络的分析合成系统中,为了合成具有期望音节周期的语音,可以用期望的音节周期生成音源脉冲序列,由此驱动音响滤波器。有人认为,采用脉冲序列这个简化方式过于粗糙,所以正在研究利用残差波形的方式^[35]。所谓残差波形,就是在分析获得音响滤波器的基础上相应地构造一个逆特性滤波器,再让输入语音通过这个滤波器所得到的波形。

3. 着眼于语音谐波构造的分析合成系统

在元音等有声音的振幅频谱中,位于音节频率的大致整数倍处会有波峰出现。从频率低端开始,依次将波峰分别称为第1次谐波、第2次谐波、……、第 n 次谐波(图2.8(b))。现在人们提出了一种方法^[36,37],将这些高次谐波重叠起来合成语音。

对每一帧语音波形做傅里叶变换,求语音的振幅频谱,然后预选出极大值对应的频率作为高次谐波的候选频率。预选过程一直持续到语音信号的最终值,然后再以帧间间隔从低频到高频的顺序依次确定频率。接下来的工作是将被选择的次谐波的频率、相位、振幅的参数提取出来,经过对相位与振幅进行插值,按照下式实现语音合成:

$$s(t) = \sum_{l=1}^{L(t)} A_l(t) \cos \phi_l(t) \quad (2.25)$$

式中, $A_l(t)$ 为第 l 次正弦波振幅; $\phi_l(t)$ 为包含了第 l 次正弦波的频率和相位的项。

4. 在波形范围内进行处理的分析合成系统

将音源与声道分离,如果只通过对音源操作来改变频率,那么由于声道特性和音源特性的失配,不可避免地会导致音质恶化。这是引发在波形范围内进行变换处理的直接原因之一^[7]。这个解决办法的一个特点是音

节的同步处理。也就是说,虽然仍利用窗函数截取波形,但是如图 2.13 所示,这时将在每一个音节周期采用 2 倍音节周期长度的窗口来截取语音。变换音节周期时,则用期望音节的周期间隔,对截取的语音波形进行排列修正,使之重叠,获得语音。在保持持续时间一定,降低音节频率的场合,被截取的语音波形数量将会过多,因此需要适当剔除一些波形。在相反的情况下,则要重复使用一些波形。源于文本的语音合成方式(TTS)能够预先正确地求出音节的周期,对运用这种方法是有利的。

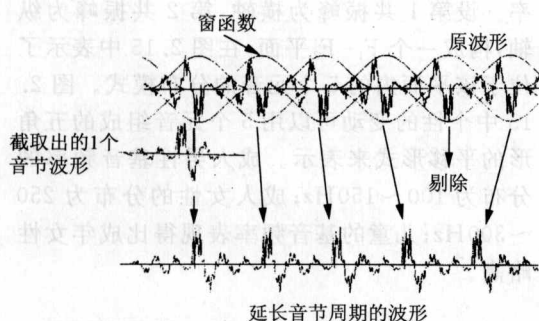


图 2.13 PSOLA 合成方式

5. 补充

一般来说,经过信号处理后的语音将丧失自然噪音的色彩,其恶化的程度会随变形程度的增加而加剧。为了减少基音频率的变形度,近年来人们提出了各种措施,如又有一种将基音频率不同的多个合成单元进行存储的方法^[38],还有一种方法认为,为了保持语音的自然本色或某人语音特色的最佳效果,原封不动地利用原始的语音波形也许更可取,即使音调不那么自然也大可不必做什么信号处理^[29,39]。

阿部匡伸

2.3 语音应用系统

大约自 20 世纪 90 年代后半期以来,语音技术,特别是语音识别产品化的呼声,频繁出现在报纸刊物上。这是因为随着语音识别技术的进步,个人计算机和微处理器的处理能力大大提高,语音识别和语音合成技术已经具备了人机交互最高级界面的可行性。普通微处理器就能实现语音识别和语音合成,这为语音的推广应用做出了特殊的贡献,语音

识别和语音合成已经成为用户界面不可或缺的技术,它在微处理器嵌入式信息家电、汽车导航系统、机器人等中应用推广的条件已经成熟。本节主要从嵌入式应用的观点,归纳一下语音处理应用系统在社会上的发展趋势。嵌入式应用着眼于小型、运动型系统,特别对于机器人来说是重要的实现手段。

在讨论应用系统之前,我们先简单地说明一下从 HI(Human Interface)的观点要求语音应该具有怎样的特征和性质。

2.3.1 支持人机界面的语音技术

语音识别和语音合成技术属于人类和机械交流的人机界面的支撑技术。语音识别和语音合成研究的最终目的就是识别人类的自然语言,以及合成与人类自然语言相同的语言。在这方面,对有限词汇的识别,对有限的定型文章的合成可以说目前已经达到了实用水平。

语音输入在技术上有赖于语音识别,要让语音输入达到应用阶段,一个不可缺少的因素就是使这个人机界面的形式更加自然。

1. 来自 HI 的语音输入的特征

通信的形态大体可以分为两类,即语音通信和非语音通信(verbal and nonverbal communication)。语音归属于前一类,它是人类通信手段中最基本、最重要且最自然的一种手段。

语音输入有下列优点:

- ① 任何人都能使用,既自然又容易输入。
- ② 可以实现一点对多点通信。
- ③ 在手、眼被占用的情况下也能使用(hands and eyes busy)。
- ④ 可以直接下达指示。例如,直接下达人名和车站名等(direct manipulation)。
- ⑤ 可以实现远距离操作。
- ⑥ 可以与其他输入媒体一起实现并行操作(多重)。
- ⑦ 可以表达喜、怒、哀、乐等感情等。

这里举出一条与其他媒体并行操作的所谓多重模态特征。从 HI 的观点来看,这是语音具有的重要特征,很可能会开辟新的 HI 范例。多模态界面(MMIF: Multi-Modal Inter-Face)之所以受到关注是因为它可以同时,或

者依次地使用多个输入、输出手段,成为一种对于人类来说极其自然的界面。模态表示的是一种可存储的信息形态(媒体),如同语音和图像那样。所谓模态化的概念,包括信息本身、信息的识别,直至知觉。因此,所谓MMIF的定义就是一种既具有多输入多输出的手段,又对这些多输入多输出手段进行解释的界面。基于MMIF的系统具有下列一些优点:模态化的输入顺序(逐次、并行)、两坐标综合信息的方法(独立、综合)、语音可以与其他输入手段同时(并行)且综合地运用等。因此,MMIF系统可以提高操作效率。作为具体的例子,有人提出一个同时运用和综合语音、手势信息的协作(synergistic)系统方案^[1]。

不过语音也存在下列一些缺点:

- ① 不能斜读。
- ② 受环境噪声的影响。
- ③ 一旦输出(发声),便无法消除。
- ④ 周围都能收听,保密性差等。

表2.1列出了语音输入与其他输入媒体在数据输入速度方面的比较情况^[2]。结果是会话的发声速度大约为每秒钟输入2.5个单词的信息量,换成键盘,即使是熟练者,每秒钟内也只能输入1个单词的数据量。显然,语音的数据输入速度比其他输入媒体的速度大得多。

表 2.1 数据输入速度的比较

输入媒体	数据发生速度/(词/s)
朗读	4
语音 自然说话	2.5
孤立发声	1
键盘(熟练者)	1(5次敲击)
在线手写文字	0.4
按钮开关	0.3
符号板	0.1

2. 语音的特征和性质^[2,3]

语音的特征有音韵性(或称语言性)、个性,还有情绪性。音韵性乃是说话者通过语音所传递的语言打算表达的结果,是可以用来文字描述的信息。一般来说,发声产生作为语言要素的音素,即音韵,在工程学上表现为频率轴上形状各异的共振频谱的共振峰(for-

mant)。语音的个性在很大程度上依赖于基音频率(pitch 或 fundamental frequency)的高低,特别是在语音频带的宽度和重音等方面表现出差异。情绪性受到多方面的影响,主要与韵律信息有关,而韵律信息又是随强调或抑制行为的变化而变化的。语音表露出的感情就是情绪性的例子。图2.14是基于模式对元音/a/和/i/的共振峰进行频率分析的结果,从频率轴的低端波峰开始,分别称之为“第1共振峰(F_1)、第2共振峰(F_2)、第3共振峰(F_3)、……”。音韵性对应于共振峰的值,个性对应于共振峰和频谱全体的形状和斜率。设第1共振峰为横轴,第2共振峰为纵轴,构成一个 F_1 - F_2 平面,在图2.15中表示了位于该平面内的5个元音的分布模式。图2.15中个性的变动可以用5个元音组成的五角形的平移形式来表示。成人男性基音频率的分布为100~150Hz;成人女性的分布为250~300Hz;儿童的基音频率表现得比成年女性略高。

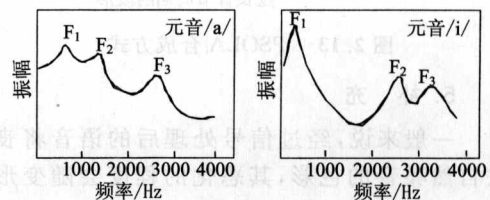


图 2.14 元音的共振峰构成

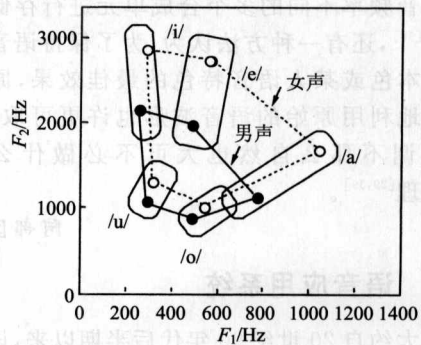


图 2.15 元音的共振峰分布

2.3.2 语音识别的应用

1. 语音识别装置的应用

- 1) 根据说话者的条件分类
这时可以区分为特定说话者(speaker-de-

pendent) 和非特定说话者 (speaker-independent)。特定说话者类型的语音识别是一个事先将说话者的语音登记, 然后对所登记的说话者的语音做高性能识别的系统。问题点是登记的手续和发声本身相当繁琐。非特定说话者类型是一种对任何语音都能识别的系统, 与特定说话者类型相比, 它的若干识别性能有所下降, 但是识别对象不受限制, 所以应用在不具备登记条件的场合, 或者与相配的说话者 (speaker adaptation) 进行编组后应用。如果能够收集到丰富的学习语音数据, 那么目前基于隐马尔可夫模型方法 (HMMs) 也能构建出这样的语音识别系统, 即使让它面对非特定说话者类型, 它也能达到大体接近特定说话者类型的识别性能。

2) 根据识别对象分类

根据识别对象分类有单词语音识别和文章语音识别。文章语音识别称为文语音识别或会话语音识别 (conversational speech recognition)。文章语音识别中, 语言处理是重要的课题。进一步进行区分, 还有任意发声的语音识别 (spontaneous speech recognition) 和语音理解 (speech understanding)。

3) 根据发声形态分类

按照发声形态可以分为孤立发声 (isolated) 和连续发声 (continuous), 或者称为离散发声 (discrete) 和连接发声 (connected) 两类。如果识别对象为单词, 那么又可以分为孤立单词语音识别 (识别分开发声的单词) 和连续单词语音识别 (识别单词连续发声的语音) 两条途径。

4) 根据词汇数量分类

根据识别对象词汇的数量可以分为小词汇 (small vocabulary size, 100 个单词范围)、中词汇 (medium, 1000 个单词左右)、大词汇 (large, 3000 个词汇以上) 三种。随着词汇量的增加识别的效果将会变差。

5) 根据语音传播的形态分类

根据语音传播的形态至少有电话语音 (telephone speech)、通常话筒输入的语音两种。对于前者而言, 有一个重要的课题, 就是怎样解决电话机和电话线路等造成的语音品质下降的问题。

2. 语音识别的应用举例

手头被其他工作占用, 又必须同时输入数据的场合, 或者专门处理语音信息的电信业务, 语音识别技术都能派上用场。前一种应用的例子可以举出工厂控制、工程管理、分拣业务等, 后一种应用的例子可以举出语音拨号盘、各种电话咨询业务等。语音识别甚至可以更进一步用于个人计算机办公自动化设备、带终端的运动机器等的命令输入。在听觉障碍者与听觉健全者之间进行会话时, 语音文字变换显示装置能起到中介作用, 它事关社会福利事业的应用, 也具有重要意义。图 2.16 整理出语音应用系统的市场情况和产品的发展动向。由图 2.16 可知, 将来机器人等嵌入式语音识别装置的市场将成长为极具规模的重要市场, 达到整体市场的 1/2 左右。图 2.17 专门给出了嵌入式语音识别系统的市场状况。

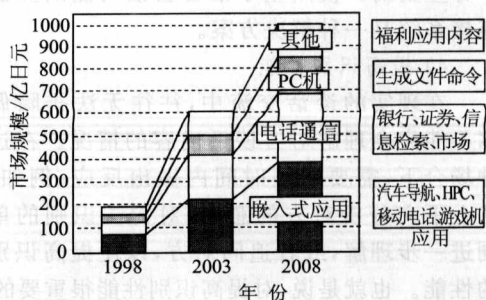


图 2.16 语音应用系统的市场和产品动向

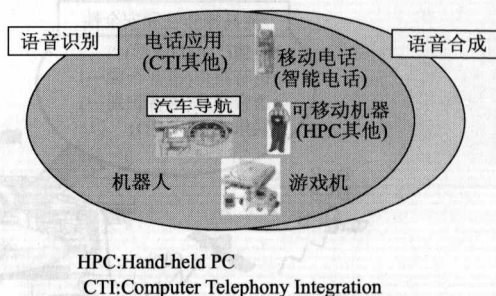


图 2.17 嵌入式中间软件的应用市场

3. 现有的技术水平和实用化的问题

对于离散单词的识别, 在面对非特定说话者的场合, 现在的技术水平已经可以识别 1000 个左右的单词, 可靠率约为 95%。对于

限定的识别对象,识别率可以达到实用化水平。但是,要达到真正的实用化程度,还有许多课题需要解决:

1) 噪声对策

在研究阶段和安静的环境中,识别性能会比较好,但是在实际环境中却会引发种种问题而无法得到满意的结果。造成这种现象的原因归咎于背景噪声、说话前后的呼吸音、舌部的爆发音等。

2) 未知语音和无意义话语对策

在一个以非特定的大众为对象的语音识别系统中,一些未知的语音,或者像“えーと”、“あー”等一类无意义的语音尚未被纳入识别对象,它们的剔除也是一个有待解决的课题。

3) 提高操作性和会话性

从 HI 的观点针对来自系统的疑问,或者提高操作性的帮助指南等做出相应的处置是十分重要的。使用基于语音会话功能的界面连接系统是一种解决方案。

4) 提高识别性能

在现实的谈话交流中,往往无法排除偶尔不能完全理解对方谈话内容的情况。在这种场合下,需要在短时间内做出反应,例如,从上下文分析对方的意思,对无法识别的单词进一步理解,或者追问对方,以便提高识别的性能。也就是说,对提高识别性能很重要的

一条是借助于意义分析进行语言处理,或者从 HI 的观点设计应对误差的界面。

2.3.3 面向通用微处理器的语音中间软件

用于语音识别和合成的语音处理中间软件,不依赖于具体的应用背景,仅仅以通用微处理器为平台,它对于机器人一类小型、移动式的设备来说是一项很重要的技术。除了机器人的应用以外,中间软件也成为汽车导航人机界面的一项技术,相关的研究开始于识别设定目的地、输入指令这一类单词语音用途,接下去的目标是高级语音界面的开发,以便能够识别那些包含部分无意义词语的连续发声的语音。

在这一节,我们来概括地看一看 ITS(Intelligent Transport Systems, 信息系统)的核心——未来汽车多媒体系统和语音界面重要性,然后介绍一些以通用微处理器为平台的、带有语音识别与合成工具的语音处理中间软件及其应用实例。

1. 汽车多媒体系统的构成和基本技术

图 2.18 概括了 CIS(Car Information Systems, 车载信息系统)的组成和必要的技术,该系统代表了未来车载信息系统的发展趋势,也可以归入 ITS 信息系统的一种。整理该

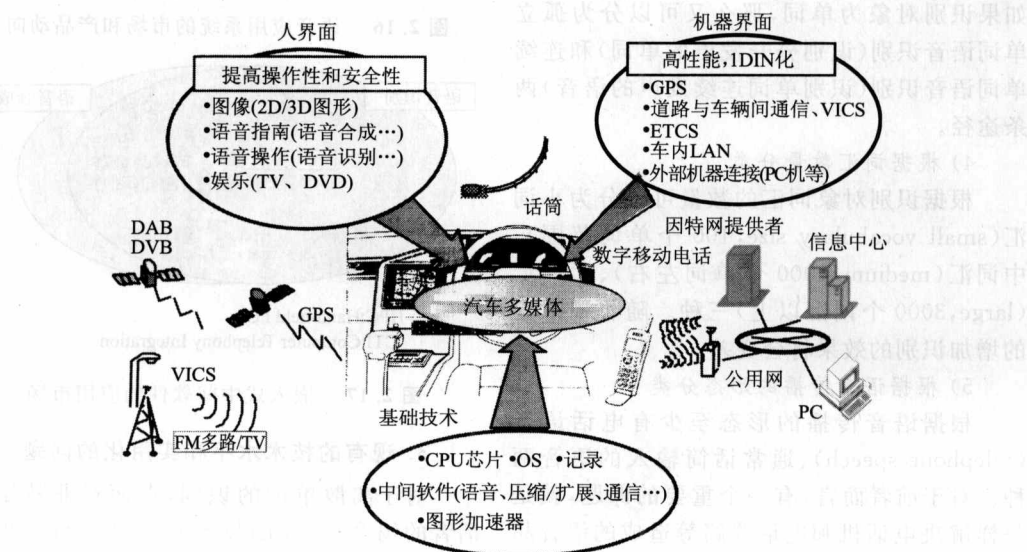


图 2.18 CIS 的组成和必要的技术

图的出发点一是挑选关键技术,即人界面和机器界面,另一个是基础技术。它所必备的功能有可操作性、高安全性、高性能和小型化。为了应付未来因特网等网络的信息,它还应该具有存取的功能。实现这些必要技术和必要功能的基础技术有通用微处理器 CPU、OS、记录媒体,以及进行语音、图像、通信处理的中间软件和图形技术。

在这些技术中,语音界面在信息存取方面能够满足操作性和安全性,因此对于未来汽车多媒体系统来说,它是不可或缺的人机界面,是一项十分重要的技术。

2. 面向通用微处理器的中间软件

由于通用微处理器(microprocessor)处理能力的提升,智能 HMIS 中必需的媒体处理,例如,语音识别、语音合成、MPEG4 等图像压缩和数据处理技术,在搭载微处理器的终端装置上都已经全部实现了。尤其是汽车导航终端装置的媒体处理功能取得了显著的进步。在这种背景下,出现了被称为中间软件的新的软件体系。图 2.19 是它的特征说明图。中间软件介于用户应用与微处理器(即 CPU)之间,它能最大限度地发挥微处理器的处理功能。中间软件的特征是适应面广、价格低廉、小型、耗电低、开发周期短。只要改变 ROM 中的程序就可以适应语音处理、图像处理等的各种语音场合,使产品的价格大大降低,而且缩短了开发周期。

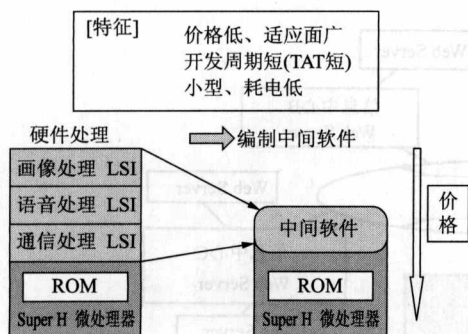


图 2.19 中间软件的特征

3. 语音中间软件的基本规格举例

以目前正在开发的 SH 语音中间软件(以 Super H 微处理器为 CPU)为例,其性能规格

如表 2.2 所示。评价时使用的电路板卡的照片和它的构成分别如图 2.20、图 2.21 所示。该中间软件在语音合成方面保持了波形音源,在韵律控制方面采用了人类自然声模式化韵律,因此它能够实现比较自然的语音合成。中间软件的识别方式采用音素片的隐马尔可夫模型(HMMs)方式,结果增强了对环境变化和发话人变动的适应性,因此这样的性能规格既抗噪声,又能适应不同的说话者^[4,5]。电路板卡 CPU 选用 SH-3(60MHz)微处理器,制定规格指标的初衷就是针对汽车导航系统的现实应用。

表 2.2 SH 语音处理中间软件工作方式

#	项 目	内 容
1	处理频率	60MHz
2	外部总线	60MHz/32bit
3	采样频率	11kHz/12kHz/16kHz
4	语音合成	合成模块
5		音源
6		给出的韵律
7		存储器大小
8	语音识别	音响模型
9		帧周期
10		帧长
11		处理时间
12		响应时间
13		词汇数
14		存储器大小

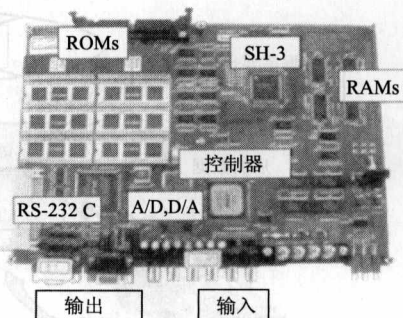


图 2.20 评价语音处理中间软件的电路板

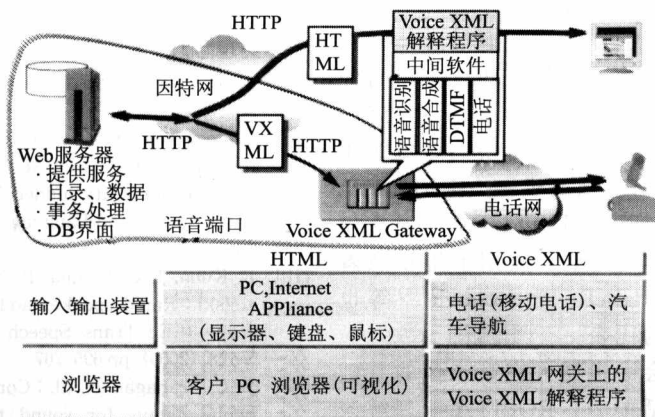


图 2.23 语音端口的构成

图 2.23 表示了配备有 Voice XML 网关的语音端口的构成。它以电话和汽车导航终端作为终端,组成访问因特网的框架。Voice XML 是一种基于 XML 的标准规格,它把 Web 的应用与语音 HI 结合了起来,代替 HTML 形成一种新的描述语言。W3C (WWW Consortium)和 Voice XML Forum 正在开展标准化和普及活动,2001 年 12 月发布了 Voice XML version 2.0^[7]。Microsoft、Cisco、Intel 等 6 家公司还倡导了 SALT(Speech Application Language Tags,语音应用程序语音标),它同样是一种描述语言的方案^[8]。

2) 多语言语音翻译业务(Mobilingual™)

还有一项语音端口的业务,就是开展多语言语音翻译业务 Mobilingual。这里的“翻译”与书面语言的“翻译”所表达的内容具有不同的含义。语音自动语言翻译/口译将来可能会有巨大的商机。语音识别与语音合成技术是实现自动语言翻译/口译的基本技术,它非常重要。图 2.24 表示了 Mobilingual 的构成。使用者用移动电话拨打服务电话号码,然后按照来自服务器的语音提示,选择口译的语言种类,此时如果将希望口译的文章以声音的形式输入,它就立即被口译成指定的语言,结果使用者的移动电话终端便有了口译内容输出,完成服务的功能。现在能够输入的语言仅仅为日语和韩国语两种(此外还有部分英语),而口译结果可以输出成 10 个国家的语言。在这个多语言语音翻译业务的目录中,准备了约 1700 个旅行会话句式,反映了基本表达、疾病、旅馆联系、饮食、购物、

寒暄等 21 种应用场面。

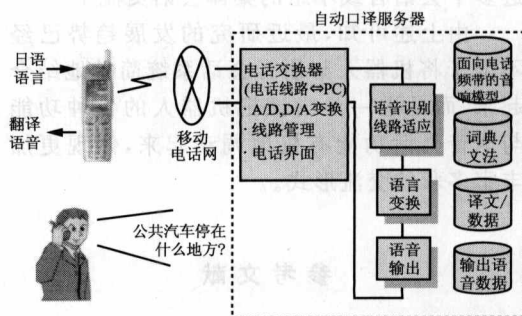


图 2.24 Mobilingual 的构成图

多语言语音翻译业务的技术基础是语音识别,语言变换依据查表方式,然后根据说话人发出的母语选择语言种类,通过录音再输出。图 2.24 所构建的系统既考虑了技术的完善性,又考虑了实现的可能性。

烟网信夫

2.3.5 会话机器人的应用

把语音会话系统嵌入机器人中的研究已经取得了进展。从与语音信息处理无关的其他功能,如机器人是否具有肢体表达功能、视觉信息处理功能等出发,可以将会话机器人分为下列三代:

对第一代语音会话机器人来说,在机器人中嵌入的语音输入输出装置仅仅能根据语音实现命令的输入和响应。例如, WABOT-1^[9]、WABOT-2^[10] 等是第一代语音会话机器人的代表。

第二代语音会话机器人除了具有视线控

制外还被赋予了表情,在会话的过程中机器人能尝试表达某些肢体动作。通过肢体动作来表现机器人内部的状态,可以提高界面的透明度,实现更为流畅的语言信息交流。Hadaly-2^[11,12]是最早问世的与谈话对象既用眼神传意,又用语言会话的机器人。ROBITA则能通过面部表情向谈话对象反馈它对交谈内容理解的程度^[13],甚至还能用手指示意着说出指示语^[14]。PaPeRo^[15]、Robovie^[16]等也是第二代机器人的代表。

第三代语音会话机器人在第二代的基础上增加了视觉会话能力。ROBITA能理解谈话对象面部表情中所包含的反馈信息,它还具有从众多的会话者中分辨出谁在注视它这一类观察会话状况的功能,因此它能够参加进多个会话者或小组的集体会话交流中^[17]。

由上述可知,最近研究的发展趋势已经不限于将机器人与语音会话系统简单地结合起来,而是进一步尝试把机器人的各种功能与语音会话功能有机地调动起来,体现更加丰富多彩的交流形式。

参考文献

- [1] 李晃仲, 鹿野清宏: 複数文法の同時認識および動的切り替えを行う認識エンジン Julius/Julian-3.3, 日本音響学会研究発表会講演論文集, 3-9-12 (2002)
- [2] 李晃仲, 河原達也, 堂下修司: 単語トレリスインデックスを用いた段階的探索による大語彙連続音声認識, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J 82-DII (1999) pp.1-9
- [3] 電子情報通信学会編: 聴覚と音声, コロナ社 (1980)
- [4] L. E. Baum, T. Petrie, G. Soules and N. Weiss: A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic functions of Markov chains, Ann. Math. Stat., Vol.41 (1970) pp.164-171
- [5] S. M. Katz: Estimation of probabilities from sparse data for the language model component of a speech recognizer, IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.35 (1987) pp. 400-401
- [6] S. F. Boll: Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction, IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol.27 (1979) pp. 113-120
- [7] J. A. N. Flores and S. J. Young: Continuous Speech Recognition in Noise using Spectral Subtraction and HMM Adaptation, Proc. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.1 (1994) pp.409-412
- [8] J.-L. Gauvain and C.-H. Lee: Maximum a posteriori estimation for multivariate Gaussian mixture observations of Markov chains, IEEE Trans. Speech and Audio Processing, Vol.2 (1994) pp. 291-298
- [9] C. Leggetter and P. Woodland: Maximum likelihood linear regression for speaker adaptation of continuous density hidden Markov models, Computer Speech and Language, Vol.9 (1995) pp.171-185
- [10] R. Kuhn, J.-C. Junqua, P. Ngyuyen and N. Niedzielski: Rapid speaker adaptation in Eigenvoice space, IEEE Trans. Speech and Audio Processing, Vol.8 (2000) pp.695-707
- [11] J. L. Franagan et al.: Computer-steered microphone arrays for sound transduction in large rooms, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.78 (1985) pp.1508-1518
- [12] H. Saruwatari, T. Kawamura, T. Nishikawa and K. Shikano: Fast-Convergence Algorithm for Blind Source Separation Based on Array Signal Processing, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E 86-A (2003)
- [13] X.-D. Huang, Y. Ariki and M. A. Jack: Hidden Markov Models for Speech Recognition, Edinburgh University Press (1990)
- [14] 中川聖一: 確率モデルによる音声認識, 電子情報通信学会 (1988)
- [15] X.-D. Huang, A. Acero and H.-W. Hon: Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development, Prentice Hall (2001)
- [16] //www.jp.aiibo.com/
- [17] //www.incx.nec.co.jp/robot/PaPeRo/p_index.html
- [18] 大中慎一, 安藤友人, 岩沢透: 人とのインタラクション機能を持つパーソナルロボット PaPeRo, 情報処理学会 音声言語情報処理研究会, SIG-SLP 37-7 (2001)
- [19] 白井克彦, 小林哲則, 岩田和彦, 深沢克夫: ロボットとの柔軟な対話を目的とした音声入出力システム—Wabot-2における対話系—, 日本ロボット学会誌, Vol.3 (1985) pp.362-372
- [20] S. Hashimoto et al.: Humanoid robots in Waseda University—Hadaly 2 and WABIAN—, Autonomous Robots, Vol.12 (2002) pp.25-38
- [21] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平: 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6 (2001) pp.1348-1358
- [22] 松坂要佐, 東條剛史, 小林哲則: グループ会話に参与する対話ロボットの構築, 電子情報通信学会論文誌 DII, Vol.J 84-D-II (2001) pp.898-908

2.2 语音合成

- [1] G. Fant: Acoustic Theory of Speech Production, Morton, S-Gravenhage (1998)
- [2] K. Stevens: Acoustic Phonetics, MIT Press (1998)
- [3] J. Flanagan and L. Rabiner: Speech Synthesis, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. (1973)
- [4] D. H. Klatt and L. C. Klatt: Analysis, synthesis,

- and perception of voice quality variations among female and male talkers, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87, No.2 (1990) pp.820-857
- [5] J. D. マーケル, A.H. グレイ Jr. (鈴木久喜訳): 音声の線形予測, コロナ社 (1980)
- [6] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer (伊達玄訳): デジタル信号処理 (下), コロナ社 (1978) pp.147-199
- [7] C. Hamon, E. Moulines and F. J. Charpentier: A Diphone Synthesis System Based on Time-Domain Prosodic Modifications of Speech, *ICASP '89* (1989) pp.238-241
- [8] 阿部, 箱田, 塚田, 水野: テキスト音声合成を用いた遠隔からのデータベースアクセスシステム, 電子情報通信学会 IS ソサエティ大会, D-463 (1996) p. 466
- [9] 浅川, 高木, 伊藤: 視覚障害者のためのドキュメント・リーダー, 信学会第二種研究会資料, WIT 00-20 (2000) pp.49-54
- [10] 嵯峨山, 小暮: 音声合成のためのテキスト解析の検討, 音声研究会資料, S 82-78 (1983) pp.617-622
- [11] 匂坂, 佐藤: 複合単語のアクセント規則の検討, 音声研究会資料, S 81-68 (1982) pp.541-548
- [12] 佐藤: 単語における音韻継続時間と発声のタイミング, 音声研究会資料, S 77-31 (1981) pp.1-8
- [13] 匂坂, 東倉: 音韻固有の性質を考慮した音韻継続時間長の設定, 音声研究会資料, S 80-72 (1981) pp. 561-568
- [14] 箱田, 佐藤: 文音声合成における音調規則, 信学論, Vol.63-D, No.9 (1980) pp.715-722
- [15] 広瀬, 藤崎, 山口, 横尾: 統語構造を利用した日本語文音声の基本周波数パタンの合成, 音声研究会資料, S 83-70 (1978) pp.547-554
- [16] 藤崎, 広瀬, 高橋, 横尾: 連続音声におけるアクセント成分の実現, 音声研究会資料, S 84-36 (1978) pp.279-286
- [17] 阿部, 佐藤: 音節区分化モデルに基づく基本周波数の2階層制御方式, 日本音響学会誌, Vol.49, No. 10 (1993) pp.682-690
- [18] 尼子, 太田, 山下, 溝口: 決定木を用いた長い名詞句に対するピッチパターン制御, 音声研究会資料, S 91-77 (1991) pp.7-14
- [19] 駒沢: 数量化理論とデータ処理, 朝倉書店 (1982)
- [20] 佐藤: PARCOR-VCV 連鎖を用いた音声合成方式, *Trans. IEICE '78/11* Vol.61-D No.11 (1978) pp.858-865
- [21] 佐藤: CVC と音源要素に基づく (SYMPLE) 音声合成, 音声研究会資料, S 83-69 (1984) pp.541-546
- [22] 東倉, 匂坂: CV 音節を単位とする音声合成, 音講論, 3-4-3 (1980) pp.623-624
- [23] K. Hakoda, T. Hirokawa, H. Tsukada, Y. Yoshida and H. Mizuno: Japanese Text-to-Speech Software Based on Waveform Concatenation Method, *AVIOS'95* (1995) pp.65-72
- [24] 中嶋, 浜田: 合成単位を自動生成する規則合成法, 音声研究会資料, SP 87-15 (1987), pp.57-64
- [25] 徳田: 隠れマルコフモデルの音声合成への応用, 信学技報, Vol.SP 99-61 (1999) pp.47-54
- [26] 龍崎, 赤嶺: 閉ループ学習に基づく最適な音声素片の解析的生成, 信学論 (D-II), Vol. J 83-D-II No. 6(2000) PP.1405-1411
- [27] 匂坂: 種々の音韻連接単位を用いた日本語音声合成, 音声研究会資料, SP 87-136 (1987), pp.47-52
- [28] 岩橋, 海木, 匂坂: 音響尺度に基づく複合音声単位選択法, 音声研究会資料, SP 91-5 (1991), pp.33-40
- [29] A. Black and N. Campbell: Optimising Selection of Units from Speech Database for Concatenative Synthesis, *Proc. of Eurospeech 95* (1995) pp.581-584
- [30] M. Beutnagel, A. Conkie, J. Schroeter, Y. Stylianou and A. Syrdal: The AT & T NEXT GEN TTS system, 137th Acoustical Society of America Meeting, Berlin (1999)
- [31] 今井, 阿部: 改良ケプストラム法によるスペクトル包絡の抽出, 信学論 (A), Vol. J 62-A No.4 (1979) pp.218-228
- [32] 中島, 鈴木: パワースペクトル包絡(PSE)音声分析合成系, 日本音響学会誌, Vol.44, No.11 (1988) pp.824-832
- [33] 板倉, 斎藤: 偏自己相関係数による音声分析合成系, 音声研究会資料 (1969)
- [34] 板倉, 斎藤: 線形予測係数の線スペクトル表現, 音声研究会資料, S 75-34 (1975) pp.1-8
- [35] 佐藤: CVC と音源要素に基づく (SYMPLE) 音声合成, 音声研究会資料, S 83-69 (1984) pp.541-546
- [36] L. B. Almeida and J. M. Tribollet: Nonstationary spectral modeling of voiced speech, *IEEE ASSP*, Vol.31, No.3 (1983) pp.664-678
- [37] R. J. McAulay and T. F. Quatieri: Speech analysis/synthesis based on a sinusoidal representation, *IEEE ASSP*, Vol.34, No.4 (1986) pp.744-754
- [38] S. Takano, K. Tanaka, H. Mizuno, M. Abe and S. Nakajima: A Japanese TTS system based on multiform units and a speech modification algorithm with harmonics reconstruction, *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, Vol.9, No.1 (2001) pp.3-10
- [39] 広川, 伊藤, 佐藤: 音素単位波形編集に基づく規則合成システム, 音講論 (1991), pp.219-220

2.3 语音应用系统

- [1] 畑岡信夫: 音声認識におけるアルゴリズム, 電子通信学会誌, Vol.69, No.4 (1986)
- [2] 新美康永: 音声認識, 共立出版 (1979)
- [3] 古井貞熙: デジタル音声処理, 東海大学出版会 (1985)
- [4] 畑岡信夫ほか: 日立評論, Vol.80, No.7 (1998) pp. 31-36
- [5] N. Hataoka, K. Kokubo, Y. Obuchi and A. Amano: Development of Robust Speech Recognition Middleware on Microprocessor, *IEEE ICAS SP 98* (Apr. 1998) pp.II 837-II 840
- [6] <http://www.nissan-carwings.com/>
<http://g-book.com/>
<http://www.internavi.ne.jp/>
- [7] VoiceXML 2.0: <http://www.w3.org/>
- [8] SALT 1.0: <http://www.saltforum.org/>
- [9] H. Fujisawa and K. Shirai: An algorithm for spoken sentence recognition and its application to

第3章 触觉和力觉识别

所谓触觉,就是有关机器人与物体接触时的感觉。所谓力觉则是有关机器人动作时对力的感觉。力觉可以分解为作用于某个代表点上的力和力矩。一般来说,机器人与物体接触的结果产生力,作为力的表现形式的力觉也可以说是触觉的一个部分。

借助于力觉和触觉传感器可以获得下列信息:

- ① 接触信息,有无触觉。
- ② 接触力信息,力觉、压力分布。
- ③ 接触区域,点信息、面信息、空间信息。
- ④ 滑动信息。
- ⑤ 物性信息,温度特性(温度、热传导率等)。

这些由力觉和触觉传感器得到的信息,属于局部信息,限于传感器与物体的接触区域内。为了实现更高级的力觉与触觉得识别,需要利用有关对象物的先验知识,或者主动地移动传感器,甚至对获得的多个传感器的信息进行综合。通过主动地移动传感器实现感知的方法称为主动传感,将触觉传感器信息与运动信息组合起来感知,称为触知觉(haptics)。主动传感的优点是在对广阔的空间进行探测的同时移动传感器,这样所获得的检测点之间的信息具有较高的分辨率。它的另一个优点是操作物体的接触动作本身也是主动传感的一部分,因此在操作物体的过程中可以同时进行力觉和触觉得识别^[1]。主动传感可以完成下述力觉与触觉得识别:

(1) 物体的识别 所谓物体的识别,就是从许多物体模型中,找出符合要求的模型。物体的识别大致可以分为形状识别和材质识别。对于前者,一个已经掌握的方法是根据接触点位于物体模型哪个边缘(或平面)的组合来定义解释树,然后根据实际的传感器信息,对发生矛盾解释的树枝进行修剪,从而探索物体模型^[2]。对于后者,温度特性、表面粗糙度、黏度等是重要的物理因素^[3]。为了获

得物体的硬度、表面粗糙度、黏度的信息,主动传感显然是必要的。

(2) 物体的形状识别 如果对象物的面积比分布式触觉传感器的感知面积小,那么从触觉图像来识别物体的轮廓就是可行的。反之,如果对象物的面积比传感器的感知面积大,那么就需要利用主动传感进行形状探索,将力觉传感器和触觉传感器得到的多种信息(点信息、面信息、形状的三维特征)进行综合后对物体的形状做出识别^[4]。

(3) 物体的位置、姿态检测 检测物体位置、姿态的前提条件是预先知道物体的形状。如果物体位于环境中,那么主要通过视觉来完成物体对位置和姿态的检测。如果物体被机器人抓持着,那么就可以通过力觉和触觉来完成抓握的位置、姿态的检测。如果物体的面积比分布式触觉传感器的感知面积小,那么根据触觉图像就可以检测出抓握的位置和姿态^[5]。反之,如果物体的面积比传感器的感知面积大,则需要将从力觉传感器和触觉传感器获得的多种信息(点信息、面信息、形状的三维特征),与被抓取物体的模型进行对照,以便检测出抓握的位置和姿态^[6,7]。

(4) 工作状态监视 通过监视接触动作中的力觉、触觉模式,或者接触点,可以检测接触状态的变化。接触状态的变化反映了工作状态的变化。实际上,从分拣料箱元件一类的边缘检查操作,到轴承装配插入作业历来都是借助于力觉或触觉来进行监视的^[8,9]。

迄今,力觉和触觉一直主要用于装配一类作业的试插入,以及机器人手部的抓握控制。但是,在机器人的感觉中,力觉和触觉不会像视觉那样得到普遍的应用,因为它们的可信性比较低,而且如果机器人在结构化环境中(如工厂生产线)从事规范作业的话,也未必非要有力觉和触觉不可。不过,由于近年来与人间共享空间和协调作业的机器人,如生活支援机器人、宠物机器人、拟人机器人

等越来越受到关注,因此力觉和触觉的重要性也开始逐渐被人们重视。我们生活的现实世界中需要处理的对象物很多,是仅限于机器人的结构化环境。在复杂的环境下,人们希望借助于视觉以及各种传感器的信息,力觉和触觉信息的重要性自然就不言而喻。另外,从安全的角度考虑,有人还想出了将触觉传感器覆盖在机器人全身的办法,可以想像,力觉和视觉的重要性今后会更加显现出来。

永田和之

3.1 触觉的平面信息识别

与视觉等非接触传感器不同,模仿人的触觉和力觉的传感器与对象物体之间一定要处在接触状态下才能完成感知,因此称之为接触传感器。下面介绍接触传感器中的触觉传感器的识别处理原理。

3.1.1 触觉信息处理(tactile signal processing)

从触觉传感器得到的图形被称为触觉图像,获取触觉信息的行为被称为触觉感知。

1. 点接触信息(二值信息、多维接触信息)

点接触信息属于二值信息,它是指通过接触探头、开关等装置只需判断两个状态,或处于接触状态,或处于非接触状态。现在人们正在开发各种高精度的接触信息检测方法,例如,已经有了球形探头、接触探针等。为了判断机器人是否已经与障碍物接触,可以使用具有一定压力或位移的检测装置,或者使用一组简单的开关等。

至于说对多维接触信息的感知,在力觉传感器(参阅 3.5 节)中将会涉及,它能把施加于一点的力信息分解成 6 个轴向分量,或者 3 个轴向分量,并显示出沿各个轴向分量的具体信息。

2. 分布压力信息和位移信息

这种传感器的制作方法是把能感受点接触压力和位移信息的装置或元素配置成矩阵,被测物体与传感器接触后,其表面形状就能从分布压力和位移信息中解读出来。

为了检测出力的分量,希望感受接触压力和位移信息的敏感元素最好能检测沿着 6

个轴向的分量。但是,目前在多数情况下还只能检测单一的分量(元素包络面的法线方向),即位移信息与力分量的情况一样,也只能检测单向。

3. 滑动信息

滑动信息是相对于分布压力传感器表面检测到的平行力或位移信息。最为理想的结果是获得面内任意方向的信息,但是目前开发的装置还仅能检测出某个设定方向上的滑动。

3.1.2 触觉图像的几何学性质

分布压力传感器得到的是二值触觉图像,它与敏感元素的排列方式以及所设定的门限值有关,称这种二值触觉图像处理为触觉图像的平面信息处理。

设用 $T(x, y)$ ($x=1, 2, \dots, m; y=1, 2, \dots, n$) 表示触觉传感器元素的排列方式,那么触觉感知所获取的平面信息可以用下面的数据表示:

$$T(x, y) = \begin{cases} 1, & T(x, y) \geq \theta \\ 0, & T(x, y) < \theta \end{cases}$$

式中, θ 为门限值。

1. 基本特征

我们利用如图 3.1 所示的二值触觉图像描述触觉图像的平面信息,下面介绍它的特征。

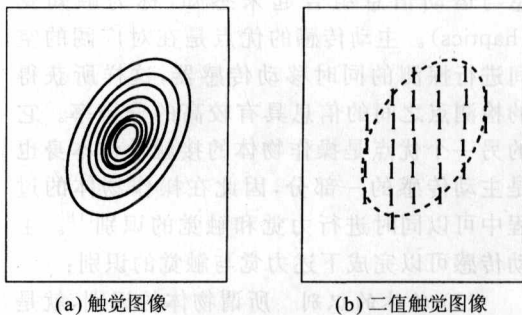


图 3.1 触觉图像的例子

① 面积。二值触觉图像的面积 of 触觉图像内“1”的数目。

② 周边长。边界线上的“1”的数目,即周边长。但是,倾斜方向上的边界线长度设定为 $\sqrt{2}$ 倍。

③ 圆度,圆度 T_c 用下式来表示:

$$T_u = 4\pi \left(\frac{S}{P^2} \right)$$

式中, S 为面积; P 为周边长。

T_u 的最大值取 1, 它的值随形状的不同而变化。

2. 惯性矩与位置的确定

设触觉传感器为矩阵形状, x 方向有 m 个敏感元件, y 方向有 n 个敏感元件。于是 0 次 m_{00} 可定义为

$$m_{00} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n T(x, y)$$

因为上式也表示触觉图像的面积, 所以可以进一步定义一次矩为

$$m_{10} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n x T(x, y)$$

$$m_{01} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n y T(x, y)$$

根据上式, 求触觉图像的重心如下:

$$x_g = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad y_g = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

围绕 y 轴和 x 轴的二次矩、惯性积矩可以分别定义如下:

$$m_{20} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n x^2 T(x, y) = \sum_{x=1}^m x^2 \sum_{y=1}^n T(x, y)$$

$$m_{02} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n y^2 T(x, y) = \sum_{y=1}^n y^2 \sum_{x=1}^m T(x, y)$$

$$m_{11} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n xy T(x, y)$$

围绕通过坐标原点的直线 $y = x \tan \theta$ 的惯性矩可用下式求出:

$$\begin{aligned} m_\theta &= \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (x \sin \theta - y \cos \theta)^2 T(x, y) \\ &= m_{20} \sin^2 \theta - 2m_{11} \sin \theta \cos \theta + m_{02} \cos^2 \theta \end{aligned}$$

式中, 针对 θ 求使 m_θ 达到最小值时的 θ 值, 有

$$\theta_g = \frac{1}{2} \arctan \frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}}$$

于是, 根据重心和惯性主轴, 就能够判断触觉图像的位置和方向。不过, 如果触觉图像本身为圆形, 那就不必求解了(图 3.2)。

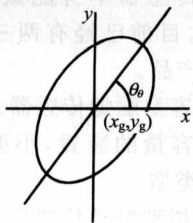


图 3.2 惯性主轴

3.1.3 被抓取物体的断面形状识别

用两根相对设置的关节手指, 或者三根手指的人工手指抓取物体, 此时是有可能识别出物体断面形状的。具体方法是在手指一系列设定的抓握过程中, 借助于手指各个杆件的触觉传感器与物体表面的接触获得触觉图像, 利用这个触觉图像就可以对抓取的物体进行识别。

如图 3.3 所示: ①是一种通过设置在手指表面的开关型触觉传感器(接触觉传感器), 仅从接触信息(图 3.3(b))进行形状识别的方法; ②是将接触信息与手指的各关节角度组合进行形状识别的方法(图 3.3(c)); ③是手指与抓取物体局部接触的形状进行识别的方法(图 3.3(d))等。

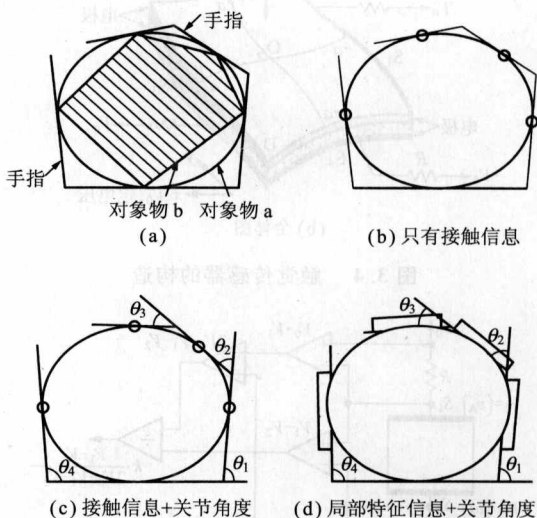


图 3.3 被抓取物体的断面形状

第①种方法对被识别的物体进行约束, 从而获得物体的接触图形, 然后根据接触图形识别对象物体。这种识别方法又分为借助于学习机械, 将接触图形分离的方法; 或者采用贝叶斯法则和切比雪夫近似式建立识别函数进行分离的方法等^[1,2]。

第②种方法是在第①种方法的基础上加进手指弯曲角度的信息^[3]。

第③种方法就是对手指与接触物体表面的局部形状进行识别, 所以需要 will 触觉传感器的敏感元件排列成一维触觉传感器。

3.1.4 二维分布载荷的中心位置检测

检测触觉传感器上载荷分布中心位置的方法已经被开发出来。图 3.4 表示了它的原理,如图 3.4 所示,在压敏导电橡胶的 A 层和 B 层中安装有柔性导电电极。导电性橡胶的特性是每个单位面积的电阻变化 $r_0 = kp^n$, (k 为常数, p 为载荷)。由 A 层到 B 层的电流密度的一次矩可以像图 3.5 那样求出。

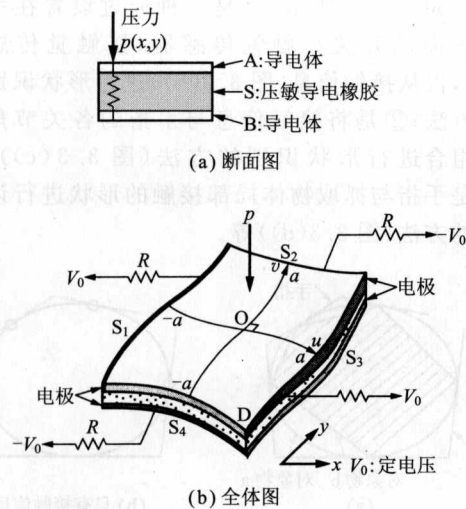


图 3.4 触觉传感器的构造

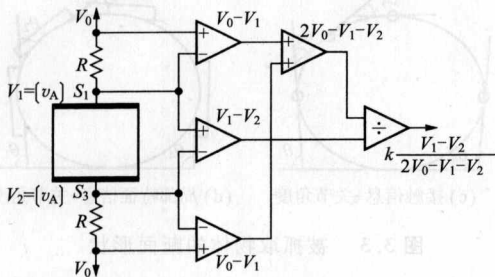


图 3.5 检测电路

该导电橡胶的特性是:当 $n=1$ 时,重心载荷即为全载荷;当 $n>1$ 时,重心载荷会从原来重心位置向偏载荷方向偏移^[4]。

3.2 触觉的立体信息识别

用触觉传感器进行三维物体表面的形状识别,大致可以分为两种情况:①通过物体表面与触觉传感器表面接触(加压)产生三维触觉图像,然后对该图像进行识别;②使安装有触觉传感器的手运动,根据伴随这种移动依

次检测到的触觉图像及其位置和姿态形成触觉图像,得到物体形状的全部信息。尤其是在当物体表面的尺度比手指的触觉传感器大的场合,应该选择第②种识别方法。

3.2.1 触觉传感器的三维触觉图像的获取

安装在机器人手指上的触觉传感器应该满足下列要求:①传感器的尺寸足够小,适合安装在手指上;②敏感元件的数量与手指上触觉细胞的分布相适应,密度约达到 $100 \times 100/\text{cm}^2$;③能得到敏感元件表面沿法线和切线方向的分量信息;④耐化学、机械、电气等方面的能力强,可靠性高等^[1]。敏感元件小型化的要求必须得到满足,因为触觉传感器必须安装在机器人手指的表面上,或者说是搭载在机器人身上。

有一种方法,将触觉传感器系统构成平顶型^[2],机器人用触觉传感器表面与抓取物体的侧面进行接触,然后从触觉图像检测被抓取物体的姿态。触觉传感器总带有一定的柔顺性,因此物体与触觉传感器的接触将会表现为一个过程,利用这个过程可以完成对触觉传感器信息的读取。

1. 光波导板型触觉传感器的举例

触觉传感器中有导电橡胶型、导电油漆型、静电电容型、光波导板型等。

① 有一种导电橡胶型^[3]触觉传感器是在 0.7mm 厚度的导电橡胶的上、下两个面上,配置间距为 1mm 的条状电极,排列成 64×64 单元的阵列,达到实时观测触觉图像的效果。不过这种场合电路容易发生寄生电流,在设计电路时务必注意避免这种现象发生。

② 导电油漆型触觉传感器是把导电油漆印刷到薄膜上,做成与导电橡胶型相同的阵列分布。这种传感器本身能做得非常薄,所以它应用广泛,目前已经有两家公司在销售这种传感器产品。

③ 静电电容型触觉传感器是一种检测电极之间静电电容量的装置,小型化触觉传感器多采用这种类型。

④ 光波导板型触觉传感器是将锥体元件排列在传感器表面的底部形成阵列,施加外力后,锥体被压缩并接触到底盘。光线从底

盘的侧面射入,将压缩图案明显地呈现在底盘上,再借助于 CCD 摄像机将压缩情景拍摄下来,经图像处理后转换为触觉图像。如果传感器表面采用硅橡胶片材料,那么它的柔性会很好,容易发生变形。

图 3.6 示出这种触觉传感器的基本原理。

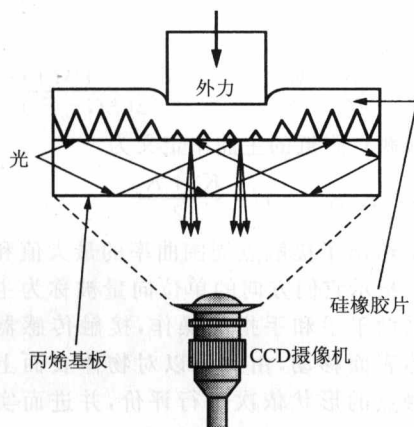


图 3.6 光波导板型触觉传感器的原理

图 3.7 表示带触觉传感器的手部结构,它被安装在三菱公司生产的机器人的手部。

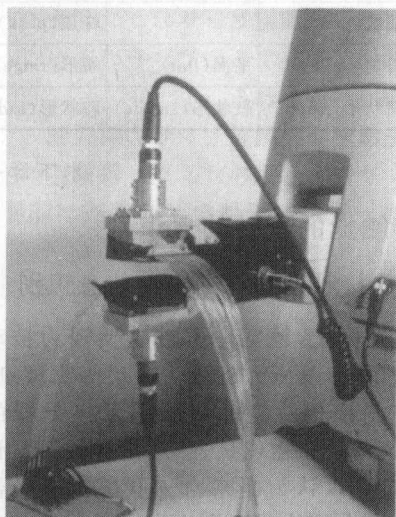
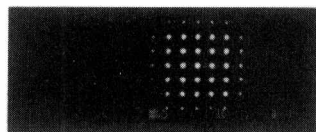


图 3.7 带触觉传感器的机械手的构成例子

图 3.8 给出了这个触觉传感器得到的触觉图像的一个例子。

图 3.8 表示往 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的立方体施加 800gf 的力后所得到的触觉图像。图 3.8(a)是原始触觉图像,图 3.8(b)是图像处理后用等高线表示的触觉图像。



(a) 原始触觉图像

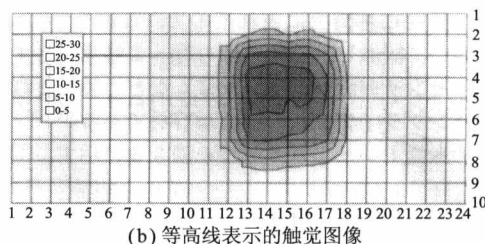


图 3.8 触觉图像的例子

2. 平顶型触觉传感器的物体识别

如上所述,导电橡胶传感器能做得很薄。显示这种传感器处理结果的方法有很多,在电视扫描线上叠加信号的监视方法^[4]也是其中之一。

图 3.9 是一个借助于压力分布等高线表示触觉图像的例子。该例子说明用触觉图像对对象物体做三维识别是可行的。为此,除了上述基于图像处理的方法之外,还可以从等高线方面反映的形状变化来进行识别^[5]。

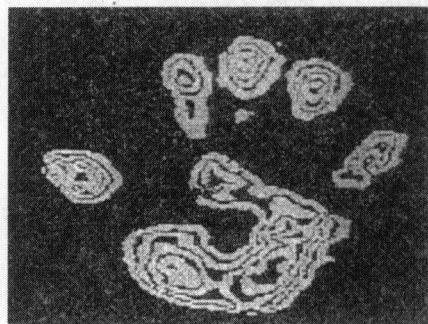


图 3.9 猫脚的触觉图像^[4]

3. 触觉传感器沿对象物表面探索进行识别

如果对象物体比手指触觉传感器表面大,就需要让手指沿物体表面进行移动,在探索中识别形状。图 3.10 是一个藏于手指内的触觉传感器^[6]在物体表面探索识别的例子。触觉传感器位于手指表面内侧,传感元件采用 RVF2 材料,电极(直径为 2.5mm ,间隔为 5mm)排列成 5×7 的阵列。针对图 3.10

(a)所示的平面,使手指在左右摆动中探索检测,得到图 3.10(b)所示的结果。图 3.10(c)举了一个三维形状识别的例子,是对弯曲管路表面进行同样探索后得到的结果。

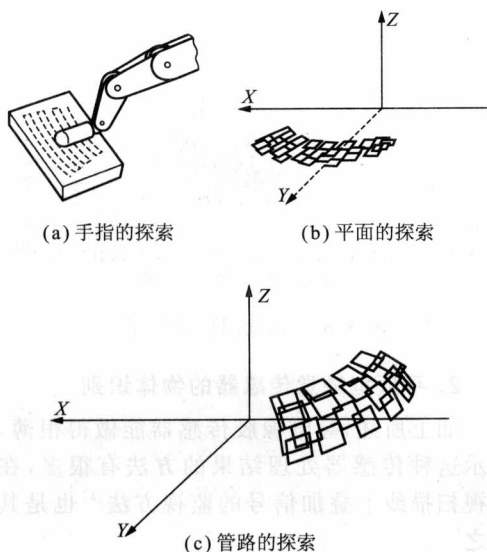


图 3.10 触觉传感器^[6]

3.2.2 基于物体表面局部触觉图像识别^[7]

把位移分布视为触觉图像,设在位移分布中有坐标系 u, v , 最初获得的接触点为 r_i , 又设接触点 r_i 近旁的位移分布为 $\delta r_m(u, v)$, 建立它与直角坐标系的关系为

$$\begin{aligned} r_i(u, v) &= \delta r_m(u, v) \\ &= (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \end{aligned}$$

这时,接触点 r_i 的切线向量可以用下式定义:

$$r_u = \frac{\partial r_i}{\partial u}, \quad r_v = \frac{\partial r_i}{\partial v}$$

设 r_u 和 r_v 相互垂直,则对于接触点 r_i , 可以定义位移分布 $r_i(u, v)$ 的切平面。可以借助于微分几何学分析该位移分布与切平面的关系,以便识别位移分布的形状。

接触点 r_i 的位移分布的法线和与物体表面接触的触觉传感器的法线方向是一致的。

$$n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$$

接触点 r_i 的位移分布的第一基本微分形式和第二基本微分形式可以分别定义如下:

$$I = Edu + 2Fdu dv + Gdv dv$$

$$II = Ldu dv + 2Mdudv + Ndv dv$$

其中

$$E = r_u \cdot r_u, \quad F = r_u \cdot r_v, \quad G = r_v \cdot r_v$$

$$L = r_{uu} \cdot n, \quad M = r_{uv} \cdot n, \quad N = r_{vv} \cdot n$$

$$r_{uu} = \frac{\partial^2 r_i}{\partial u^2}, \quad r_{uv} = \frac{\partial^2 r_i}{\partial u \partial v}, \quad r_{vv} = \frac{\partial^2 r_i}{\partial v^2}$$

为了对接触点附近的形状加以评价,可借助于高斯曲率 K 和平均曲率 H , 它们由表 3.1 给出。

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}, \quad H = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)}$$

再将接触点附近的主曲率定义为

$$K = K_1 K_2, \quad H = \frac{K_1 + K_2}{2}$$

主曲率给出了接触点周围曲率的最大值和最小值。指示它们方向的单位向量被称为主方向。借助于手和手指的操作,接触传感器能沿物体表面移动,由此可以对物体表面上各个接触点的形状依次进行评价,并进而实现对物体表面大范围的形状评价。

表 3.1 基于高斯曲率和平均曲率的平面形状分类

	$H > 0$	$H = 0$	$H < 0$
$K > 0$	凹坑 (pit)	—	峰顶 (peak)
$K = 0$	谷地 (valley)	平面 (flat)	峰形 (ridge)
$K < 0$	鞍状形 (saddle)	鞍状形 (saddle)	鞍状形 (saddle)

木下源一郎

3.3 触觉的物性信息识别

3.3.1 接触型知觉的物性信息识别

迄今为止,触觉一直被主要视为被动识别机构,它涉及压力、温度、振动等物理刺激,与这些刺激相对应的皮肤感觉受器的识别,以及刺激和物理量、感觉量的关系。识别外界时,可以认为是来自皮肤感觉受器的信息能在大脑体感区内忠实地映射出相应的位置,或者说体部位再现性 (somatotopy) 将来自皮肤受器的信息再现到大脑的相应部位上,使外界被识别出来。但无论如何,以上均出于被动识别机制下的考虑。对物性信息的识别(如材质和表面状态等)则不然,光把手指放在对象表面上还不够,此时必须用手去触摸,或者说按照某种意图,用手指在对象上

以一定的方式进行移动和探索。

例如,触摸运动能让人们检测出玻璃表面上 $1\mu\text{m}$ 的粗糙度。Gibson 分析了这类将皮肤感觉和运动感觉综合起来的触觉知觉,将之视为主动接触,并阐述了它的重要性^[1]。但是,Gibson 不重视在探索接触运动的同时将指挥手动作的肌肉运动指令辐射到大脑体感区(离心性复制信息),例如,他未能说明受人引导的手接触运动与自主接触运动的区别。因此,依据皮肤感觉感受器信息、肌肉和关节等的运动感觉信息、它们与离心性复制信息的组合,可以将现有的人类接触知觉模式分为五种^[2]。其中的主动接触型知觉模式近年来逐渐被用来充当机器人工程学的触觉识别方式。

图 3.11 举了一个用接触型知觉识别材质的例子。这幅图取自 Taylor^[3] 和岩村^[4] 的研究,经过加工修改后绘制出来。识别对象材质的时候,首先要检查硬度、表面状态、温度特性等,再将这些信息加以综合得到知觉图像,然后在与先验经验的记忆图像比照的基础上做出判断。这个过程可以被大致地划分为两大部分:一是行动生成部分,其任务是制定理解对象的探索战略,产生手指的探索运动;二是感觉信息处理部分,其任务是根据从手指感受器得到的信息形成知觉图像,然后与记忆图像进行对照。行动生成部分包括:①决定探索行动的战略,如按压或抚摸;②探索动作的控制和运动算法的生成,如手指的动作或力的施加方式等;③对涉及探索动作的各种肌肉活动实施控制,对手指实施探索运动,如接触运动。由于手指运动引起

皮肤与对象之间力学上的相互干涉,因而在感觉信息处理部分;④根据皮肤感觉感受器得到的信息(如温度变化、振动、变形、力的方向等);⑤来自手指运动牵动的肌肉和关节的运动感觉信息;⑥实施对手指运动控制系统反馈的三个部分整合起来;⑦与离心复制信息综合形成知觉图像;⑧将这个知觉图像与先验经验的记忆图像进行对照,完成对材质的判别;⑨如果对照一致,材质就被判别出来,反之就再次重复循环上述探索行动的过程。也就是说,需要经过探索战略的决定→行动→验证→战略变更这样的循环过程实施对对象材质的识别。可以设想,这种运作程序对采用触觉传感器的物性信息识别技术也具有参考价值。

3.3.2 触觉传感器的物性信息识别

下面介绍一些利用触觉传感器进行材质和表面状态等物性信息识别的研究成果。首先举一个判别材质的例子,它属于接触运动和多个传感器信息的综合系统^[5]。该系统如图 3.12 所示,敏感头里配备有温度传感器、振动传感器、摩擦传感器等能检测临摹速度和接触力的三种传感器,让敏感头与对象物间共计做 9 次往复摩擦运动,读取温度变化、振动、摩擦和变形信息并进行综合,检测出对象物的材质。其中,振动传感器用话筒充当,伴随临摹运动获取振动信息;温度变化采用热敏电阻检测;摩擦和变形是通过检测临摹运动状态下敏感头的位移获得的。识别的算法是把传感器得到的信息分解成温度变化率、高、中、低频振动成分等 8 种特征量,根据

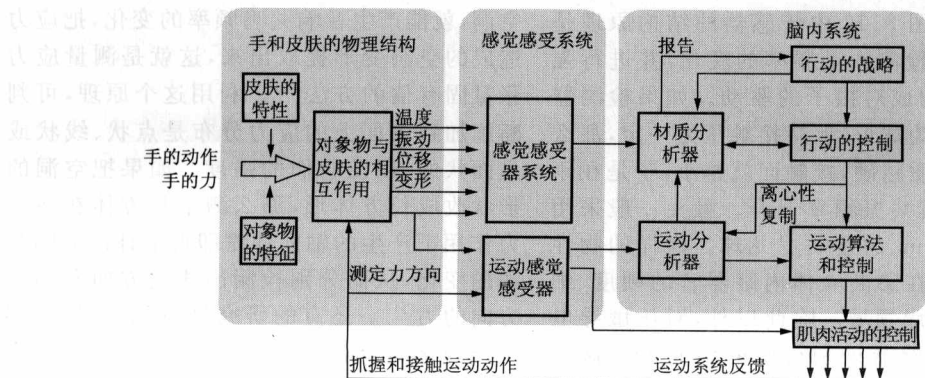


图 3.11 接触型知觉的物性信息识别

相互信息量基准逐次选择特征量。在实验中,针对木材、金属、高分子材料,乃至对人来说也十分难以辨别的纸张质地(图画纸、复印纸、包装纸、设计纸等)、标准手感的布料质地(男士夏季服装的质地)进行检测,该系统几乎都能够准确地判别出来。

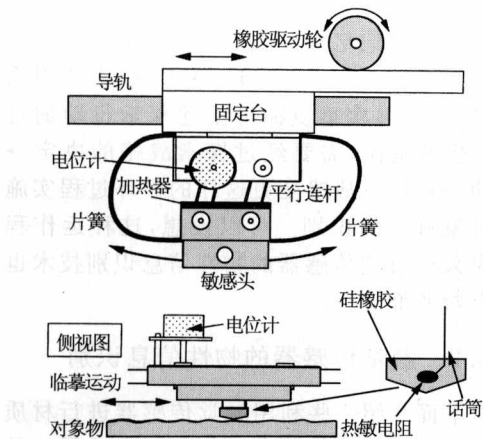


图 3.12 主动感觉综合的物性信息识别系统^[5]

研究人员还发表了一些基于人类接触感觉辨别材质感的研究报告,这些报告涉及与材质感有关的物理参数的推测方法,以及它们对材质感的影响力^[6]。报告指出,上述研究结果表明,表面粗糙度、黏着度等物理量对材质感的判别有一定的影响,而温度变化的模式信息产生更重要的影响。报告还比较了基于接触运动的材质感在信息量传达方面的区别。

至于其他有关物性信息的研究,还可以举出对象物硬度检测传感器^[7]的例子。研究报告指出,让振子与对象进行接触,接触物体的特性会使有限长的振动棒的固有振动频率发生变化。图 3.13 中传感器的结构原理是利用检测器检测振动频率的变化,并进行强制反馈,以构成对振子的驱动。如果检测器顶部的触头为球形,保持接触压力一定,那么对象物的材质越硬,接触面就越小,于是在刚度影响下,其共振频率上升。触头一般采用半径为 1.5mm 的硬质尼龙球。这样的物性传感器应用在诊断人体内脏器官的硬度、细胞硬度等医疗领域。除此以外,对压敏导电橡胶触觉传感器识别材质的研究也在探索中,例如,让它与对象物进行接触,同时检测温度变化和电气特性^[8]。在这个传感器中,温

度变化是靠加热器自行加热产生的,借助于接触对温度变化进行测量,电气特性则是依靠梳状排列的电极对电容和电感进行测量。

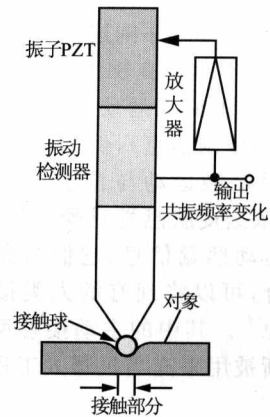


图 3.13 硬度检测传感器

下面再介绍几个关于表面状态检测的例子。据说,皮肤的机械特性和传感器的空间配置,对人类的触觉机能有很大的影响。因此,最近有一些研究就针对如何主动利用这种弹性体构造进行信息处理而展开。例如,有的研究发现,随着应力的空间频率分布向构造体深处传播,频率增益下降,衰减率因空间频率的不同而异。根据这个现象有人提出了一种方法,测量构造体深度方向上不同位置的两个点的频率功率比,由此来计算表面压力分布的空间频率^[9]。依据这种方法,在抚摸对象物表面的同时,顺便就能测量出接触表面的粗糙度和接触速度等。

另外,有的研究发现,表面应力分布的延展特征会反映到弹性体内部的应力张量上,利用这个特性,在弹性体内加工出一个球形空洞,就能产生音响共鸣频率的变化,把应力造成的空洞变形提取出来,这就是测量应力张量固有值的方法^[10]。利用这个原理,可判断施加到表面上的应力分布是点状、线状或是面状的,以及它们的强度。如果把空洞的形状改成长方体形,那么测量长方体在接触力作用下产生的轴向伸缩即可估计出共鸣频率的变化,从而分别检测出法线方向和切线方向的力^[11]。还有的研究报道说,如果把多个压力检测器沿传感器表面的水平方向进行排列,通过电路让各个检测器的输出延迟,做成一个串联式触觉传感器,那么就能够通过

对接触运动的感知来测量表面的状态^[12]。它的原理如同一个带通滤波器型的空间滤波器,把多个检测器的输出关于传递延迟时间作积和运算。由于临摹对象表面的传感器接触运动的速度不同,滤波器的特性也发生了变化,从而可以截取出特定的空间频率。

3.4 触觉的抓握信息识别

在利用手部抓握获取接触信息、识别对象物的研究中,包括两大研究内容,即人类抓握机理的研究以及机器人手部的研究。这里我们首先对人类抓握机理的研究做一个简单的介绍。迄今,在人类抓握方面,已经针对规划、编程、抓取、抓握等方面开展了许多研究^[1,2]。不过,这些研究都是基于抓握时手腕动作和手指形状的测量展开的,很少涉及抓握的接触信息研究。

有关抓握的研究,最早的当数 Schlesinger 在第一次世界大战中对伤残者假手的分类,其后 Taylor、Schwartz^[3] 和 Kapandji^[4] 等许多学者都曾涉猎这一领域。有人从解剖学的观点出发对抓握进行分类,不过这些分类绝大多数是围绕手指的形态展开的,如握、抓、掐等,从而奠定了抓握的经典分类方法。Naiper^[5] 既不依据抓握形状,也不依据物体的形状或大小,而是从作业的目的着手,将抓握大致分成稳定可靠的力度抓握(power grip)和精巧作业的精度抓握(precision grip)。现在对抓握的分类基本上都参照 Naiper 的观点。Cutkosky^[6] 等把这个抓握状态又进一步分为 16 种。粗略的分类大致有两类,即 power grasp 和 precision grasp,而细致的分类则进一步根据抓握对象物的形状、抓住对象物手指的形状,再加上手指的数目等进行划分。众所周知,触觉传感器手套已经问世了,所以有的研究报告也发表了根据触觉传感器手套对抓握状态进行分类的结果^[7]。

但是,上述研究几乎从未涉及过接触状态和抓握力。在抓握力的研究方面,Johansson 等^[8] 曾经利用一对拇指和食指来抓握对象物,他们从对象物质量变化、手指接触部分材质(即改变摩擦系数)变化的角度,观察夹起力和抓握力的变化,进行抓握过程的分析。Arbib 等^[9] 从力学观点对抓握做了说明。他们倡导 opposition grip 的抓握主张。这种主

张认为抓握现象可以用三个假想指的作用来解释,其中两个假想指构成一对相互抗衡力,另一个假想指产生操纵力。不过,关于接触状态的研究还比较少。Kamakura 等^[10] 向对象物的表面涂抹墨水,然后从抓握时墨水附着在手上的分布情况,对抓握状态进行测量和分类。除此以外,还有一种叫做 preshaping 现象的研究,该研究关注抓握时物体和手的形态,根据作业目的和物体形状,让手的形态预先按照目的进行构形,以便满足抓取作业^[11] 的要求。

将上述抓握状态的测量研究应用于工程实际的例子可以举机器人作业示教方法。Kang 等^[12] 早期开发过一个系统,该系统先让人把抓握作业试运行一遍,然后让机器人去重复同样的作业。这种方法被称为 teach by showing,是一种十分有用的人机界面方式。人们发现,依据上述 Cutkosky 等的方法对抓取状态进行分类时,需要测量手指的形状和对象物的接触状态,这会造成计算机进行自动分类时的困难。因此,Kang 等从更实用的角度出发,提出按照手指的接触状态(contact web)进行抓握状态分类的方案。所谓 contact web,就是在描述抓握状态时,不再沿用以往手指形状的方法,而改成如图 3.14 所示的观察操作者手部共计 15 处(指部 14 处、掌部 1 处)接触的集合情况。按照掌部是否接触可以将抓握方式分成两大类,再根据剩余的 14 处部位可以更细致地对抓握方式进行分类。然后,根据抓握中各根手指的作用,对各根手指的功能进行分组,再与机器人手部的手指构造做比较,通过功能映射,最后将其实际安装到机器人手部。

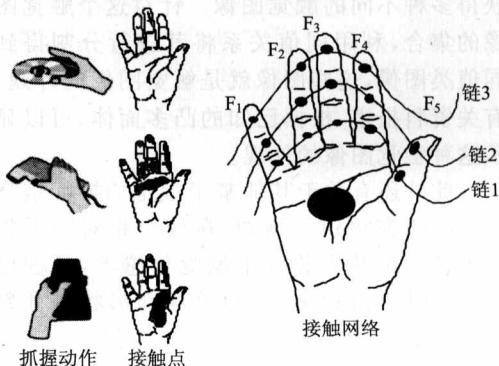


图 3.14 基于接触网络的抓握信息识别

现在,对一些对象物识别的研究已经靠机器人展开了,即让机器人手部抓握对象物,根据接触信息来识别对象物。机器人手部安装传感器,根据抓握时物体的形状与手部(触觉传感器)之间的几何学构造对应关系可以实现某种程度的测量。已有的研究成果中我们可以举出靠嵌入接触传感器的三根手指对已知形状物体识别的例子^[13]。该研究抓握的对象是形状已知的多角形物体,根据指尖接触点与接触面法线方向进行抓握物体的识别。识别前需要事先逐一读取接触点与物体表面之间的各种接触图像,以解释树的形式把它们表示出来,再根据物体抓握时获得的传感器信息,对解释树进行修剪,最后完成对抓握对象的识别。

木下等还提出一种依据接触图像外观法对抓握物体进行识别的方案^[14]。外观法是一种主要应用于视觉信息处理的方法。利用视觉传感器测量三维形状时,随着视线方向的变化,被观察到的形状也发生了变化。这时,被获取的图像存在两种情况:一种是各个面的形状发生变化,但它们的相对位置关系不变;另一种是一度被隐藏的面有时能被捕捉到。后一种情况表示被见到的面以拓扑的形式变化着,称这种变化为外观变化。这样一来,观察三维形状的方法就可以分为两种:一种方法是连续地改变视线方向,其结果是外观的变化是无限的;另一种方法是离散地改变视线方向,其结果是外观的变化是有限的。利用有限个外观的集合描述三维形状的方法被称为外观法。木下等曾把这种方法应用到触觉图像处理中。当采用分布触觉传感器与物体接触时,由于接触方向、姿态不同,能够获得多种不同的触觉图像。针对这个触觉图像的集合,利用同值关系将其进行分割得到同值类图像,这些图像就是触觉图像的外观。有关资料报道,根据已知的凸多面体,可以显示这种触觉图像的外观。

此外还有关于其他基于触觉的抓握信息识别的研究报道。例如,在两个相对的手指和手掌上总共安装3个触觉传感器,抓握已知物体时通过检测边、角等局部形状特征判断抓握位置^[15]。另外,在手指和手掌上安装了检测接触压力的总和以及力的中心位置^[16]的传感器,而在其余手指上则安装了另一种

分布式传感器。为了提高抓握角度的检测精度,在进行实际数据处理时可以将测量值叠加起来,以求得三个传感器测量误差的平方和最小。还有一份研究报道介绍了一种将触觉传感器缠绕到圆筒状手指上按压物体,检测对象曲率的方法^[17]。

下条 诚

3.5 力觉信息识别

力觉传感器测量物理量力和力矩,能够检测出全部六维分量的传感器叫做6轴力觉传感器,实际上它也能进行接触位置的测量,甚至能够用来估计抓取物体的位置、姿态和形状。本节介绍6轴力觉传感器的力学量和接触位置的测量及其应用。

不过,6轴力觉传感器不像分布式触觉传感器那样能得到接触力分布状况的信息。另外,因为它并非是直接与接触部位接触而进行检测,所以它必须满足若干假定条件。实际上,现在的情况已经有所改善,6轴力觉传感器的产品甚至小到能够安装在多指手的指端。6轴力觉传感器检测接触位置的实用性还是很高的,尽管在使用时经验仍然十分重要。需要指出的是,本文下面内容所涉及的力觉传感器均指6轴力觉传感器。

3.5.1 接触信息的测量

如图3.15所示安装力觉传感器,考虑在其顶端发生接触时的情况。图3.15(a)表示机械手在前端固定的工具与外界接触,或者多指手的指端与物体进行接触。图3.15(b)表示机械手手部抓取物体,然后再与其他物体进行接触。

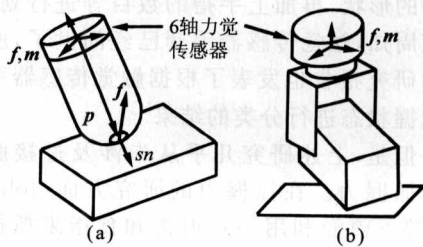


图3.15 接触与力觉感知

将接触分为点接触、线接触(或面接触)。点接触是指接触面积小到可以忽略不计的场合。线接触和面接触中,在接触部分有分布

力作用,但是分布状况未知。将分布力进行合成,可以等价变换成作用于合力中心 p 的合力 f 和沿接触部分法线方向的接触力矩 sn 。在这里,设 s 为力矩的大小, n 为单位法线。在一定条件或假定下,6 轴力觉传感器的这些量应该都能够测量出来。在下面的讨论中,除去点接触的情况外,凡提及接触位置的均指合力中心。

1. 无接触力矩作用的情况

用力觉传感器测量的力和力矩有如下关系:

$$m = p \times f \quad (3.1)$$

实际上,前端本身的自重所产生的重力和力矩也会同时施加于力觉传感器上,需要采取一定的措施,或通过计算扣除,或减去接触前的测定值,剩下接触产生的实际力和力矩。

设 t 为任意标量,则式(3.1)的解 p 变为

$$p = \frac{f \times m}{\|f\|^2} + tf \quad (3.2)$$

这个解代表一条直线上的点,但是仅由一个点还无法确定。

在前端几何形状已知,而且为凸形的条件下,求出与该直线的交点,便可以确定接触点。此时一般求出两个交点,如果假定作用在物体上的力是压力,则接触力可以唯一决定。在图 3.15(a)中,可以假定前端几何形状是已知的。在图 3.15(b)中,则必须已知物体的位置、姿态。

如果无法利用前端几何形状信息,那么上述方法就不适用了,但是仍然可以通过对力和力矩组做两次以上的测量来确定接触点。因此,在无接触力矩的场合有两种测量接触点的方法:一种方法是改变姿态^[1];另一种方法是改变力^[2],其前提是假定接触点不变。

假定通过测量得到 N 个数据,有

$$Ap = b \quad (3.3)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} -S(f_1) \\ \vdots \\ -S(f_N) \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_N \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

设 $S(a)$ 为 3×3 斜对称矩阵,即 $S(a)b = a \times b, \forall a, b \in R^3$ 。在式(3.3)中,一般条件数比未知数多。如果将 $\|Ap - b\|^2$ 达到最小解作为式(3.3)的最小二乘解,而 $\text{rank}(A) = 3$,

则可求得

$$p = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.5)$$

2. 有接触力矩作用时的情况

假设能够利用前端的几何形状信息。先来看平面,因为它显然是典型的接触部分形状。设作用到力觉传感器上的力和力矩为

$$m = p \times f + sn \quad (3.6)$$

当平面法线 n 已知时,可以求得 $s = (f^T m) / (f^T n)$

若设

$$m' = m - (f^T m / f^T n) n$$

则下式成立:

$$m' = p \times f \quad (3.7)$$

据此,与前述无接触力矩作用的情况类似,可以求出接触位置 p 。

下面来讨论接触部分为半球面(半径 r)的情况。设力觉传感器被设置在半球的中心,当然这不是本质问题,事实上,如果偏离中心,只要将被测得的力和力矩变换成施加到半球中心的力矩即可。另外,既然是面接触,接触部分就会发生变形,不过我们假设的变形比较小,能够忽略不计。

因为接触点被表示为 $p = rn$,故作用于力觉传感器上的力矩 m 为

$$m = rn \times f + sn \quad (3.8)$$

由此得到

$$n = (sI - S(rf))^{-1} m \quad (3.9)$$

进一步,将式(3.8)的两边与向量 n 做内积得到

$$n^T m = n^T (rn \times f) + n^T (sn) = s \quad (3.10)$$

把式(3.9)代入式(3.10)中展开,得到

$$s^4 + (r^2 \|f\|^2 - \|m\|^2) s^2 - (rf^T m)^2 = 0 \quad (3.11)$$

这是一个关于 s 的四次方程式,有两个实根。从 s 出发利用式(3.9)有两个途径可以计算法线 n 。假设接触力是施向物体的压力,那么它是唯一决定的。

文献[3]将接触部分的形状从半球面改为一般的二次曲面,讨论了在这种情况下求解接触位置、接触力矩的方法。如果接触部位的形状为凸形,那么可以证明接触位置也是唯一决定的。

3.5.2 抓取物体的位姿估计和形状识别

当用力觉传感器测量接触位置时,还能

得到其他各种信息。本节介绍通过多指手抓取物体,实现位置/姿态估计的方法。假设各根手指 $i=1, \dots, N$ 的指端构件上都安装有传感器,并且各根手指的指端与抓取物体相接触。

设被抓取物体的形状已知,而且为多面体,还一一了解各根手指分别接触哪个平面(图 3.16)。

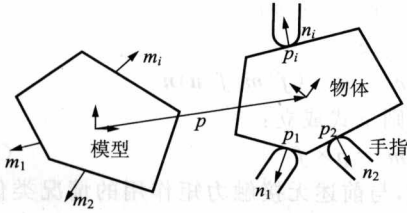


图 3.16 物体位姿的识别

在物体坐标系中,手指 i 接触面的方程式以下列形式给出:

$$m_i^T x = d_i \quad (3.12)$$

设由力觉传感器能够测量出接触位置 p_i 、法线 n_i 。首先求物体的姿态 R ,它应该与由物体模型法线 m_i 所测量出来的法线 n_i 最为一致。然后, R 用旋转轴 r 以及绕其旋转的转角 θ 表示,设 $q_0 = \cos(\theta/2)$ 为标量部分, $q = \sin(\theta/2)r$ 为向量部分,于是可以用四元数将它表示为^[4]

$$Q = q_0 + q \quad (3.13)$$

设向量 m_i 旋转到与 n_i 一致时,下列等式成立:

$$n_i Q = Q m_i \quad (3.14)$$

四元数的积 $W = UV$ 定义如下:

$$w_0 = u_0 v_0 - u^T v \quad (3.15a)$$

$$w = u_0 v + v_0 u + u \times v \quad (3.15b)$$

式中,设 $U = u_0 + u, V = v_0 + v, W = w_0 + w$ 。通常的向量则是标量为零的四元数。

观察式(3.14)中的向量部分,有

$$(n_i + m_i) \times q = q_0 (n_i - m_i) \quad (3.16)$$

设 $q = q_0 g$, 对 $i=1, \dots, N$ 进行归纳,可以得到下列矩阵形式:

$$Ag = b \quad (3.17)$$

若 $\text{rank}(A) = 3$, 用最小二乘求解得到解为

$$g = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.18)$$

进而,若 $q_0^2 + q^T q = 1$, 可以求得

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + g^T g}} \quad (3.19)$$

求得物体的姿态 R 后,接下来借助于最

小二乘法求解被测定的接触位置 p_i 与式(3.12)的各个接触面最接近的物体位置,这相当于使下式最小化的问题:

$$E = \sum_{i=1}^N \| m_i^T R^T (p_i - p) - d_i \|^2 \quad (3.20)$$

若 $\text{rank}(C) = 3$, 可求得解为

$$p = (C^T C)^{-1} C^T d \quad (3.21)$$

其中,设

$$C = \begin{bmatrix} m_1^T R^T \\ \vdots \\ m_N^T R^T \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} m_1^T R^T p_1 - d_1 \\ \vdots \\ m_N^T R^T p_N - d_N \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

需要注意的是,如果手指抓取的是物体的平行平面,那么它的解将不是唯一的。

也有人研究了在各根手指与平面接触的一一对应情况不明的条件下被抓取物体位姿估计和形状识别的解决方法^[5,6]。不过,为了最终获得唯一解,此时必须借助于视觉传感器得到的全局信息,或者通过手指的主动探索得到更多的信息。

再进一步的问题是在抓取物体形状未知的条件下,如何利用指端与物体表面的接触,获取接触位置和法线的几何信息,对物体形状进行识别。已经有一些基于抓取变化来识别平面形状^[7]、三维形状^[8]的研究报道。

如上所述,力觉传感器当然能够获得接触力、接触力矩的力学信息,以便进而估计外力并调整平衡所需的指端力^[9]。除此之外,力觉传感器还有其他应用场合,例如,图 3.15(b)在平行夹钳抓取物体时进行位置姿态的测量^[1],或者在双足步行机器人中测量 ZMP^[10],文献[11]对相关应用做了综述。

小侯 透

参考文献

- [1] 永田, 慶野, 小侯: 多指ハンドの物体操作による把持物体形状モデルの獲得, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.10 (1998) pp.1487-1493
- [2] P. C. Gaston and T. Lozano-Perez: Tactile recognition and localization using object models: The case of polyhedra on a plane, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No.3 (1984) pp.257-266
- [3] 伊福部: 人工現実感と触覚, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7 (1992) pp.885-892
- [4] D. Brock and S. Chiu: Environment Perception of an Articulated Robot Hand Using Contact Sen-

- sors, ASME Publication PED-Vol.15, Robotics and Manufacturing Automation (1985) pp.89-96
- [5] M. R. Driels : Pose Estimation Using Tactile Sensor Data for Assembly Operations, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1986) pp.1255-1261
 - [6] S. Shekhar, O. Khatib and M. Shimojyo : Sensor Fusion and Object Localization, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1986) pp.1623-1628
 - [7] 永田, 小笠原, 高瀬 : 接触情報を用いたロボットの把握位置姿勢の推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.7 (1992) pp.783-789
 - [8] K. Kitagaki, T. Ogasawara and T. Suehiro : Methods to Detect Contact State by Force Sensing in an Edge Mating Task, Proc. of 1993 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.2 (1993) pp.701-706
 - [9] 藤原, 北垣, 小笠原 : 疑似接触点位置情報のベアリング組立作業への応用, 日本機械学会誌 (C), Vol.65, No.638 (1999) pp.4107-4113
- ### 3.1 触覚的平面信息識別
- [1] 工藤, 佐藤, 高田 : 感覚器官をもった人工の指による物体の認識, 計自論, Vol.10, No.3 (1986) pp.116-122
 - [2] 木下, 高瀬, 森 : 人工触覚によるパターン認識, 計自論, Vol.7, No.1 (1971) pp.25-30
 - [3] 岡田 : 触覚をもつ多関節のつかみ情報による物体認識, 計自論, Vol.10, No.2 (1974) pp.94-101
 - [4] 石川, 下条 : 感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心位置の測定法, 計自論, Vol.18, No.7 (1982) pp.730-735
- ### 3.2 触覚的立体信息識別
- [1] S. Begej : Planar and Finger-shaped Optical Tactile Sensors for Robotic Applications, IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.4, No.5 (1988) pp.472-484
 - [2] 谷江 : 分布型触覚センサの現状と開発例, 第4回センシングフォーラム (1987) pp.33-38
 - [3] 下条, 石川, 金谷 : 高密度フレキシブル圧力分布イメージャ, 日本機械学会論文集 (C), Vol.57, No.537 (1991) pp.150-156
 - [4] 石川, 下条 : ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理, 計自論, Vol.24, No.7 (1988) pp.662-669
 - [5] 木下, 森 : 多素子人工触覚の受容素子間隔の決定法, 計自論, Vol.8, No.5 (1972) pp.33-39
 - [6] P. Dario, G. Buttazo : An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Pattern, The Inter. J. of Robotics Research, Vol.6, No.3 (1987) pp.25-48
 - [7] 木下, 菅野, 大隅, 梅田, 村奈嘉 : 高コンプライアンス形触覚センサの開発とその物体表面の曲率推定への応用, 電学論 (C), Vol.120, No.3 (2000) pp.390-396
- ### 3.3 触覚的物性信息識別
- [1] J. J. Gibson : Psychological Rev., Vol.69 (1969) p.477
 - [2] J. M. Loomis and S. J. Lederman : Tactual Perception, In Handbook of Perception and Human Performance, Willv, New York (1986) pp.1-41
 - [3] M. M. Taylor, S. J. Lederman and R. H. Gibson : Handbook of Perception, Vol.III, Academic Press (1973) Chapter 12
 - [4] 岩村吉晃 : 脳と認識 (伊藤正男編), 平凡社選書 (1982) pp.145-165
 - [5] 阪口豊 : 能動的感覚統合による触知覚認識システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8 (1995) pp.1217-1226
 - [6] 井野秀一, 伊福部達ほか : 触覚の材質提示システムのための基礎研究, 電学論 (C), Vol.117, No.8 (1997) pp.1062-1068
 - [7] 尾俣定夫 : 硬さ測定用触覚センサ, 超音波 TECH NO, Vol.9, No.3 (1997) pp.6-9
 - [8] 湯治準一郎 : 感圧ゴムセンサによる多機能的材質識別, 計測自動制御学会, Vol.33, No.7 (1997) pp.582-587
 - [9] H. Shinoda et al. : A tactile sensor using three-dimensional structure, IEEE Proc. Robotics and Automation, Vol.1 (1993) pp.435-441
 - [10] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando : Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (1997) pp.3087-3092
 - [11] K. Nakamura and H. Shinoda : A tactile sensor instantaneously evaluating friction coefficients, Proc. Transducers, Vol.2 (2001) pp.1430-1433
 - [12] 下条誠, 石川正俊 : 空間フィルタ形触覚センサを用いた能動センシング, 電子情報通信学会論文誌 (C-II), Vol.J 74-C, No.5 (1991) pp.309-316
- ### 3.4 触覚的把握信息識別
- [1] 鎌倉矩子 : 手のかたち手のうごき, 医歯薬出版 (1989)
 - [2] C. L. Mckenzie and T. Iberall : The Grasping Hand, Advances in Psychology, North-Holland Elsevier Science B.V. (1994) p.104
 - [3] C. L. Taylor and R. J. Schwartz : The anatomy and mechanics of the human hand, Artificial Limbs, Vol.2, No.2 (1955) pp.22-35
 - [4] I. A. Kapandji : The Physiology of the Joints, Volume One. Upper Limb (5th ed.), Churchill Livingstone (1982)
 - [5] J. R. Napier : The prehensile movements of the human hand, J. Bone and Joint Surgery, Vol.38 B (1956) pp.902-913
 - [6] M. R. Cutkosky and R. D. Howe : Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis, Dextrous Robot Hands, Springer-Verlag (1990) pp.5-31
 - [7] S. Shimizu et al. : The Relationship between Force Distribution Patterns and Grip Types in Human Grasping Motions, 8th Int. Conf. Advanced Robotics, Monterey (1997) pp.299-304
 - [8] R. S. Johansson and G. Westling : Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects, Exp. Brain Res., Vol.56 (1984) pp.550-564

- [9] M. A. Arbib, T. Iberall and D. M. Lyons: Coordinated control programs of the hand, A. W. Goodwin and I. Darian-Smith (eds.), *Hand Function and the Neocortex*, Exp. Brain Res. suppl. (1985) pp.111-129
 - [10] N. Kamakura, M. Matsuo, H. Ishii, F. Mitsuboshi and Y. Miura: Patterns of static prehension in normal hands, *American J. Occupational Therapy*, Vol.34, No.7 (1980) pp.437-445
 - [11] 福村直博, 宇野洋一, 鈴木良次, 川人光男: 対象物の形状認知と把持するための手の形の決定, 第5回生体・生理工学シンポジウム (1991) pp.37-40
 - [12] S. B. Kang and K. Ikeuchi: Toward automatic robot instruction from perception-recognizing a grasp from observation, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.9, No.4 (1993) pp.432-443
 - [13] P. C. Gaston and T. Lozano-Perez: Tactile recognition and localization using object models: The case of polyhedra on a plane, *IEEE Trans., PAMI*, Vol.6, No.3 (1984) pp.257-266
 - [14] 木下源一郎, 入江俊充, 谷江和雄: 触覚センシングによる物体表面の触覚像取得, 計測自動制御学会論文誌, Vol.31, No.6 (1995) pp.692-698
 - [15] S. Shenker, O. Khatib and M. Shimojo: Object localization with multiple sensors, *Int. J. Robotics Research*, Vol.7, No.6 (1988) pp.34-44
 - [16] 石川正俊, 下条誠: 感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心位置の測定方法, 計測自動制御学会論文誌, Vol.18, No.7 (1982) pp.730-735
 - [17] R. S. Fearing and T. O. Binford: Using a cylindrical tactile sensor for determining curvature, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.7, No. 6 (1991) pp.806-817
- 3.5 力覚信息识别**
- [1] 永田, 小笠原, 高瀬: 接触情報を用いたロボットの把握位置姿勢の推定, 計測自動制御学会論文誌, Vol.28, No.7 (1992) pp.783-789
 - [2] 北垣, 小笠原, 末広: 能動的力覚センシングによる物体の辺合せ動作, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1990) pp.395-398
 - [3] A. Bicchi: Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1990) pp.968-973
 - [4] J. F. Canny: *The Complexity of Robot Motion Planning*, The MIT Press (1988) pp.34-37
 - [5] W. E. Grimson and T. Lozano-Perez: Model-based recognition and localization from sparse range or tactile data, *Int. J. of Robotics Research*, Vol.3, No.3 (1984) pp.3-35
 - [6] J. L. Schneider and T. B. Sheridan: An automated tactile sensing strategy for planar object recognition and localization, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.12, No.8 (1990) pp.775-786
 - [7] 永田, 慶野, 小俣: 多指ハンドの物体操作による把持物体形状モデルの獲得, 計測自動制御学会論文誌, Vol.34, No.10 (1998) pp.1487-1493
 - [8] M. A. Farooqi and T. Omata: Online construction of the manipulation model of an unknown object by a robot hand using the regrasping primitives, *Advanced Robotics*, Vol.14, No.2 (2000) pp.135-151
 - [9] T. Schlegel, M. Buss, T. Omata and G. Schmidt: Fast Dexterous Regrasping with Optimal Contact Forces and Contact Sensor-Based Impedance Control, *Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation* (2001) CD-ROM
 - [10] 李, 高西, 加藤: 6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6 (1992) pp.828-833
 - [11] 永田和之: 把握中のセンシング戦略 その2: 把持物体の把握位置姿勢推定, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7 (1993) pp.973-979

第4章 传感器高级应用

“传感器高级应用”一章所研究的内容不只是获取传感器信息,完成所谓的识别,而且要用传感器构成一个系统,把信息应用于机器人行动的反馈。因此,与其说提高单个传感器装置的性能,还不如说本章的重点在于讲解了传感系统的智能技术和信息处理技术。本章关于传感器高级应用的另一个切入点是系统的高速化、高可靠性和灵巧性。

1) 高速化

半导体和处理器技术的发展,使传感数据的处理速度不断得到提高,为一度难以实现的图像数据实时处理提供了可能性。例如,可以在保持传统电视摄像机拍摄一幅画面的周期(TV 帧)的前提下,通过高速图像数据处理专用硬件改进原有系统。比如,有一种视觉跟踪系统商品,能对图像数据做高速运算,从而扩大了机器人视觉反馈控制的应用范围。在行动理解研究中,高速图像处理对于基于视觉信息实时理解人类动作来说是不可缺少的。

近年来,由于 CPU 的处理速度显著提高,甚至全软件图像实时处理系统都被开发出来了,它能够代替专用硬件处理图像数据。例如,有一种机器人视觉应用系统,能利用帧滞后实现立体图像的外部环境三维信息提取。全软件图像处理的优点在于 CPU 速度提高后,不必改写软件,就能加快全系统的处理速度。

在基于视觉传感器的控制中,如果采用通常的 CCD 摄像机,那么每 33ms 才能完成一次图像输入,可见伺服周期会受到一定限制。近年来,这个技术障碍已经被突破,例如,伺服周期为 1ms 的高速图像处理系统已经被开发出来,本篇 4.4 节提及的多指手对移动物体实施动态抓握所采用的视觉/触觉融合控制就是靠它实现的。

本篇 4.3 节曾经提及“动态视觉反馈控制”发展的背景,其先决条件之一就是高速视

觉处理。基于图像雅可比矩阵的反馈控制的支撑技术包括传感器数据处理的高速化。

2) 高可靠性

传感器信息不可避免地带有不确定性。因此,鲁棒地应对外部环境变化或噪声影响,可靠地提取本质信号,并将之反馈至机器人系统的控制技术是极其重要的。概率统计方法广泛地被应用于实现这个任务。方法的典型例子是卡尔曼滤波器(Kalman filter)。尽管本篇 4.1 节讲解了传感器融合,但由于机器人与动态系统打交道,所以免不了涉及较多的卡尔曼滤波器的应用。20 世纪 90 年代,为了克服卡尔曼滤波器所受到的限制,人们研究出蒙特卡罗滤波器方案,它在对象物的图像跟踪、移动机器人定位等问题中得到应用。

如果把滤波分成信号级别,将之导入更高符号级别的信息处理,那么传感器应用的可靠性技术也会发展起来。

3) 灵巧性

有关传感系统灵巧性的内容很丰富,它包括:①与单一传感器的性能极限相对应;②与传感器外部状况的变动相适应;③与其他系统的结合对应等。

传感器的融合与①、②、③全都相关。如果是属于理解人类行动的研究课题,那么可望从②和③中找到答案。视觉反馈控制涉及②中外部状况的变动所对应的问题。至于触觉反馈控制和力觉反馈控制,如果与①、②结合起来,并以多指触觉和力觉传感器信息为基础,那么就有可能克服单一传感器的局限性,满足多种应用的需要。

坂根茂幸

4.1 传感器融合

人类(不仅限于人类,许多生物也类似)在外界的驱动下,会产生一般被称为五感的感受。多数情况下,视觉和听觉等感觉器官

并非单独使用,而是将多数感觉组合起来应用。例如,与他人会话的时候,你不只用听觉去识别对方的声音,还同时用视觉识别对方的表情和姿态等。再举步行的例子,不但需要用视觉去识别环境,还需要配合脚掌的触觉和力觉,以及在平衡感觉的驱动下行走。

机器人以及其他机械同样可以把多个传感器组合起来,实现单一传感器所无法实现的功能和特性,这种情况被称为传感器融合(sensor fusion),有时也称之为传感器综合(sensor integration)。多传感器对机器人灵巧适应环境,完成智能作业过程来说往往是不可缺少的。可以说,传感器融合是机器人学必不可少的一项技术。

4.1.1 传感器融合的分类

心理学领域里“fusion”(融合)一词被定义为从多个感受器对某些现象或对象的输出得到一个统一的知觉表象的过程。如表4.1所示,石川从工程意义上把传感器融合分为复合(multi-sensor)、综合(integration)、融合(fusion)、联合(association)四大类^[1]。也就是说传感器融合包含了广泛的概念。人们在使用融合这个词汇时通常不大在意它的分类,但是将传感器融合作为对象进行研究时,就必须解释它究竟具有怎样的意义。

表 4.1 传感器融合的分类及其目的^[1]

分类	意义	各个传感器的信息(A,B)与处理的关系	处理的目的
复合	多个传感器组合在一起	$A, B \rightarrow A+B$; 不涉及相互关系,或者说是独立的、互补的。属于加法处理	避免功能的单一性和局部性,扩大测量范围等
综合	形成支配功能	$A, B \rightarrow f(A+B)$; 用处理运算 f 规定了两者的关系,属于乘法处理	提高精度和可靠性,缩短处理时间,实现故障诊断
融合	构成紧密的结晶体	$A, B \rightarrow C$; 根据相互关系获得统一的知觉表象,属于协调和竞争处理	双目融合(立体视觉),视觉/触觉融合(物体识别、空间识别)等
联合	形成关联功能	$A, B \rightarrow (A \rightarrow B, B \rightarrow A)$; 提取相互关系。属于联合处理	预测、学习和记忆、建模、异常检测等

表4.1是着眼于融合本身概念的分类。还可以根据融合数据抽象化的等级来进行分类,这时一般从低等级开始,依次分为 data level、feature level、decision level^[2]。

4.1.2 采用的算法

目前,尚无一个结构和算法能够普遍适用于所有传感器的融合。通用的结构和算法还处于尝试阶段,例如,所谓的 logical sensor 的抽象化传感器模型^[3]。至于系统结构,有人提出按照前述输入输出等级将融合模块划分为 DAI-FEO(data in-feature out) fusion 等5个类型,以及将这5个类型动态组合起来的柔性结构^[2]方案等。然而,结构不单单与融合的概念以及等级有关,在具体对象的传感器融合的实施层面上,也不得不随传感器种类、属于同类或异类传感器融合、融合的目的和输出等因素,因地制宜地构建融合结构。总之,必须选择适当的算法^[4,6]以满足对象的具体要求。笼统地说,进行低水平融合时多半采用信号处理和统计处理方法,进行高水平融合时多半采用人工智能和知识工程的方法。

1. 信号处理与统计处理的应用

如果对象的物理模型能够被明确地加以描述,而且计算结构也可以构建,那么各种信号处理和统计处理算法就都允许使用。特别是在低级融合中,基于最优估计法(maximum likelihood method)的最小二乘法(least square method)^[7]是常用的基本方法。其他的如基于与条件概率相关的贝叶斯定理(Bayes' theorem)的贝叶斯决策理论(Bayesian decision theory)也得到广泛应用^[8]。如果是面对一个动态系统(虽然不限于动态系统),那么卡尔曼滤波器(Kalman filter)方法^[9]往往有效。由于多数情况下机器人本质上都是动态的,所以常常采用卡尔曼滤波器。如果事先求解计算结构相当困难,那么通过自组织获得计算结构的神经网络方法将十分有效^[10]。

2. 人工智能和知识工程的应用

如果对象的逻辑结构能够建立起来,那么各种人工智能和知识工程的方法都可以得到应用。人工智能和知识工程的核心是推理方法,对此,古典的、基于法则的推理(rule

based reasoning) 仍然可以发挥作用, 不过用贝叶斯决策理论、Dempster-Shafer 理论等处理起来显得更灵巧, 因为它们引入了概率方法。如果概率定义起来有困难, 那么也可以改用模糊推理(fuzzy reasoning)。

4.1.3 基本融合算法的程式化

本节涉及上述传感器融合算法中最基本的内容, 即基于最小二乘法的融合算法程式化的问题, 并且以立体视觉(stereo vision)为例加以说明。

1. 程式化

设传感对象表示为 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$ 。目的是融合处理由 m 个传感器得到的测量数据, 以便对 \mathbf{x} 进行估计。设各个测量数据分别由 m_i 个测量值组成, 并且 $\mathbf{y}_i = [y_{i1}, \dots, y_{im_i}]^T (1 \leq i \leq m)$ 。 \mathbf{x} 与 \mathbf{y}_i 之间的计算结构可以设为 $\mathbf{y}_i^0 = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}^0)$, 角标 0 表示不含误差的真值。再设 \mathbf{y}_i 的测量不准确度协方差矩阵 \mathbf{C}_{y_i} 已知, 并且测量数据 \mathbf{y}_i 与 \mathbf{y}_j 之间是不相关的 ($i \neq j$)。

1) 对象与测量数据之间为线性关系的情况

设 $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}$ 。式中, \mathbf{A}_i 是 $m_i \times n$ 的系数矩阵。其实, $m_i < n$ 也无妨。在上述条件下, 由最小二乘法可以求得传感对象 \mathbf{x} 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 和不确定度的协方差矩阵 \mathbf{C}_x 。

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i^T \mathbf{C}_{y_i}^{-1} \mathbf{A}_i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i^T \mathbf{C}_{y_i}^{-1} \mathbf{y}_i \right) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{C}_x = \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i^T \mathbf{C}_{y_i}^{-1} \mathbf{A}_i \right)^{-1} \quad (4.2)$$

2) 对象与测量数据之间为非线性关系的情况

在这种情况下, 融合结果无法以解析形式给出, 解的最佳估计值(最优估计值) $\hat{\mathbf{x}}$ 在下式达到最小值时被给出:

$$\sum_{i=1}^m (\mathbf{y}_i - \mathbf{f}_i(\mathbf{x}))^T \mathbf{C}_{y_i}^{-1} (\mathbf{y}_i - \mathbf{f}_i(\mathbf{x})) \quad (4.3)$$

式(4.3)中的最小化问题采用高斯-牛顿法(Gauss-Newton method)等求解即可^[7]。所得到的表达估计值不确定度的协方差矩阵与线性情况相同, 也以式(4.2)的形式给出的。式中, \mathbf{A}_i 采用估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 的雅可比矩阵(Jacobi matrix)。

$$\mathbf{A}_i = \left. \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \quad (4.4)$$

另外, 如果 \mathbf{x} 和 \mathbf{y}_i 之间的关系无法写成 $\mathbf{y}_i^0 = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}^0)$, 而是用隐函数 $\mathbf{f}_i(\mathbf{x}^0, \mathbf{y}_i^0) = 0$ 来描述, 那么此时仍然能够计算出估计值及其不确定度^[11]。

2. 立体视觉的例子

如图 4.1 所示, 设将两台相距 $2a$ 的摄像机平行配置。为简单起见, 认为摄像机是标准的, 焦点距离规格化成 1。传感对象被测量点的三维坐标为 $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$, 它在各台摄像机图像中以测量数据形式表达的二维坐标分别为 $\mathbf{y}_1 = [u_1, v_1]^T$, $\mathbf{y}_2 = [u_2, v_2]^T$, 于是传感对象和摄像机 1 的测量数据之间的关系如下式所示:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) = \left[\frac{x+a}{z}, \frac{y}{z} \right]^T \quad (4.5)$$

因此, 式(4.4)的雅可比矩阵为

$$\mathbf{A}_1 = \frac{1}{z^2} \begin{bmatrix} z & 0 & -(x+a) \\ 0 & z & -y \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

至于摄像机 2, 仅将式(4.5)、式(4.6)中的 $x+a$ 替换成 $x-a$ 即可。

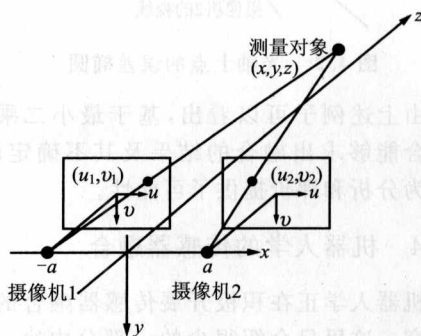


图 4.1 立体视觉的传感器融合

由于图像纵方向和横方向的不确定度均为 σ^2 且不相干, 故可以假设两台摄像机测量数据 \mathbf{y}_1 和 \mathbf{y}_2 的不确定度是相等的, 于是有

$$\mathbf{C}_{y_1} = \mathbf{C}_{y_2} = \sigma^2 \mathbf{I}_2 \quad (4.7)$$

式中, \mathbf{I}_2 为二维单位矩阵。根据上述讨论, 由式(4.2)便可以求得三维坐标 \mathbf{x} 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}$ 的不确定度为

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_x &= \sigma^2 (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2)^{-1} \\ &= \sigma^2 \frac{\hat{z}^2}{2a^2} \begin{bmatrix} \hat{x}^2 + a^2 & \hat{x}\hat{y} & \hat{x}\hat{z} \\ \hat{x}\hat{y} & \hat{y}^2 + a^2 & \hat{y}\hat{z} \\ \hat{x}\hat{z} & \hat{y}\hat{z} & \hat{z}^2 \end{bmatrix} \quad (4.8) \end{aligned}$$

如果遇到本小节第1项第2小项所谈及的非线性场合,此时虽然无法求出估计值 \hat{x} 的解析解,但根据立体视觉的双极约束(epipolar constraint)条件,假设 $v_1 = v_2$,就可以求出解析解 $\hat{z} = 2a/(u_1 - u_2)$,尽管此时会丧失解的最佳性。

在式(4.8)中,元素(3,3)表示 \hat{z} 的协方差 σ_z^2 ,它与 \hat{z} 的四次方成比例,换言之,标准偏差 σ_z 与 \hat{z} 的平方成比例。也就是说,立体视觉中求得的光轴方向的距离误差与距离的平方是成比例的。另外,如果测量点恰好位于光轴上,那么式(4.8)的非对角元素将变为0。这时,表示 \hat{x} 分布的误差椭圆(error ellipse)的各个轴的半径分别为 σ_x 、 σ_y 、 σ_z ,如图4.2所示。

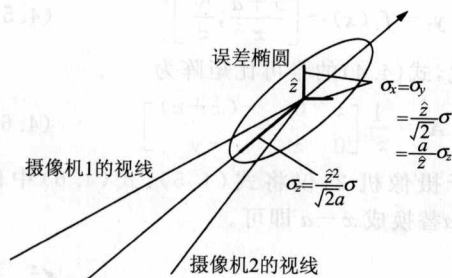


图4.2 光轴上点的误差椭圆

由上述例子可以看出,基于最小二乘法的融合能够求出融合的结果及其不确定度,从而为分析和评价提供了可能性。

4.1.4 机器人学的传感器融合

机器人学正在积极开展传感器融合的有关研究。这里只介绍很少的一部分内容。众所周知,Allen等开发的基于模型库的识别系统涉及视觉和触觉的融合^[12]。视觉和听觉融合正在被用于三维特征测量的研究^[13],即使是同样的传感器融合,如果用途不同,融合方法也往往相左。另外,向井等在视、触觉融合中采用了主动感知(active sensing)^[14]的概念。从本质上说,机器人总是伴随运动的,因此主动感知这一点在传感器融合的应用领域,特别是在机器人学方面起到十分重要的作用。坂根等利用视觉和力觉构建了估计抓持物体接触位置的系统^[15]。视觉和力觉彼此之间似乎不存在直接关系,但是由于它们都能描述与接触位置之间的计算结构,所以能

够实现基于最小二乘法的融合。利用超声波传感器数据、灰度图像、距离图像的融合,实现移动机器人在导航、自身位置识别、制作环境地图等方面的研究也开展得相当广泛^[16,17]。多台机器人的分布感知(distributed sensing)也是一个重要的发展方向^[18]。

在传感器融合的专著方面,可以举出文献[4]为例。在综述论文方面,文献[5]的内容比较详尽。日本机器人学会会刊^[19,20]及其他学会会刊也都出版专集针对传感器融合的研究成果进行报道^[21~23]。以传感器融合为主要议题的国际会议也十分活跃,比较熟知的会议有从1994年开始,由IEEE和日本机器人学会共同举办的MFI(IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems)和它们从1998年开始共同举办的FUSION(International Conference on Information Fusion)等。

梅田和升

4.2 行为理解

4.2.1 行为理解的概况

所谓行为理解是系统对人和机器人系统自身行为的观察功能,以及系统对自身随后可利用程度的评估功能。

行为理解功能可以分为两类:①机器人系统对人的行为进行观察功能;②由系统自身对机器人系统的行为进行观察的功能。

行为理解功能①是从机器人的角度观察人的行为,了解人在做什么。该功能的目的是:(a)用于人机界面,达到机器人的动作与人的行为和谐一致;(b)应用于机器人模仿工程学,实现机器人模仿人进行作业;(c)用于人体工程学,例如,理解人的动作,弄清楚人类动作的原理,以便提高机器人再现人类动作的程度。

行为理解功能②是机器人系统对自身行为理解的功能,又分为下列两种情况:第一种情况是机器人自身观察自己的行为,知道自己在做什么。为了使行为与作业状况的变化或作业内容的变化和谐一致,弄清楚自己在做什么这一点很重要。因此,机器人自身观察自己的行为、知道自己在做什么的功能是它生成自律行为,实现误差修复所不可缺少

的功能。逆向思考一下,我们便能充分理解这一点的重要性。例如,工业机器人,如果它不带传感器,不具备行为理解功能,那么在局外人看上去,机器人在焊接时,安装在手部的焊条前端频繁地接近零件,接通电流后施焊,其实这些焊接作业无非是在事先设定机器人作业环境和动作顺序的前提下编排好的,一旦零件设定的位置稍稍错动,机器人的动作会出现较大的误差,焊接过程就无法维持。总之,虽然机器人看似在焊接或做其他操作,其实它本身并没有实施焊接作业的感觉或意识。如果给机器人配备某些传感器,让它具有实施焊接作业这样的行为理解功能,那么一旦焊条前端距离零件过远,或者它碰到零件上,机器人理应就能够识别出来,并对造成作业中断的动作做出修正,维持作业顺利继续下去。可见,行为理解功能就是摆脱异常状态,或者修正异常错误,实施鲁棒性作业的功能。第二种情况是系统观察自身以外的机器人的行动,知道它们在做什么。这种功能的目的是让机器人自身的行为能够与其他机器人的行为和谐一致。

为了实现上述行为理解功能,机器人应该具有以下几个基本功能:

① 行为表现。如何用计算机表现机器人的行为是实现行为理解功能的重要方面。是借助于符号等级表现行为,抑或用信号电平表现行为,将导致行为理解方法的极大区别。

② 行为测量。人类或机器人系统的行为和举动的测量,对于在现实世界中实现动作行为理解功能来说是不可缺少的。具体地,人类和机器人,甚至与作业关联的对象物体,它们的动作和姿态依赖于传感器的检测。

③ 从传感器信号生成行为表现。即从(2)测量得到的信号,生成①中阐述的行为表现形式的功能。

④ 生成的行为表现的利用。即对③生成的行为表现的利用功能。典型的应用例子可以举与人的行为和谐一致的机器人系统。它应该能够修改执行程序,以便改变系统自身的举动,以适应机器人的行为。

4.2.2 行为理解研究举例

下面介绍几个已经提出的且一直在实施中的行为理解功能的研究工作。

平井、佐藤^[1,2]等基于作业对象操作相关知识库,在远距离作业系统(遥控机器人)的作业实施中采用了行为理解功能。如果遥控机器人实施作业的指令由作业程序发出(例如,把对象物从位置P移动到位置Q的作业任务),在遵照程序命令实施作业的同时,遥控机器人能自动更新随之产生的对象物位置的变化(世界模型的变化)。在该例子中,作业结束后,对象物的位置不是P点而是更新到Q点,因此应该记住这个命令,让数据也随之更新。

有了这种功能,如果再次发出抓取对象物的命令,机器人就能往对象物最新的位置移动去抓取它(此时处于位置Q)。反之,换成操纵主机械手实施作业,跟随主机械手运动的对象物的位置变化,并不反映到世界模型中,因此当程序再次发出抓取对象物的命令时,依据的位置信息是过时的数据,手部将前往旧位置(不是位置Q,而是位置P)去执行抓取动作。这篇论文提出操纵行为理解功能的目的是,当人作为操作者操纵机械手时,它应该能够引起知识库中对对象物位置信息等世界模型数据的自动更新。这篇论文的特点是将对象物操作行为的理解能力限定在 pick and place 作业范围内,事先规定了 pick and place 作业的解释规则,基于这种规则,开发了解释操作行为的生产系统。这是最早提出行为理解的概念和术语词汇,并将其付诸实现的一篇论文。

国吉等^[3,4]研究了知识系统从视觉角度观察和理解人类物理行为的机制,开创了 learning by seeing 这个新的研究领域。他们认为构建关于行为理解的理论体系时,必须考虑行为的执行问题,从而构建了涉及观察、理解、执行的知识信息处理模型。基于以上认识,他们提出了一个“基于演示的作业示教”的方法,在所构建的系统中观察、理解人类演示的手工作业过程,通过与示教完全不同的环境、初始状态、机械手,自动生成程序,实施等价的作业。研究提出一个机器人示教的新方法,并且给出了实例。

国吉等的论文把行为定义为达到某种目的的行动对环境造成影响的过程。在作业中,行为与操作具有相同的意义。为了识别什么是行为,可以将动作按照运动的性质粗

略地进行分类,进而再针对各种动作,具体地整理和表示出可能存在哪些操作,以及动作与环境变化的关系。实验不仅已证明,从心理学的角度看,人类观察行为的时候,有明确的识别和分段,而且对分段和识别以及注视点控制的概念做了分析和整理。国吉等的论文指出,为了识别行为,与其说只需要极简单的状况信息就够了,不如说过分详细的信息甚至是有害的。一些特征虽然简单,但易于检测,它们似乎与某个现象的发生有十分确定的依存关系,基于这种关系,国吉等研究出注视点主动控制的方法。

作为注视点主动控制的应用事例,可以特别列举在操作前对操作对象范围的预测和确定问题,国吉等通过视觉探索将其实现。他们提出的行为观察和识别的信息处理模型包括状况特征检测器、环境模型、行为模型、注视点的节点和栈点等,基于这个模型能够实现主动控制注视点的同时,完成信息提取综合算法。在此基础上,国吉等开发了新的系统,该系统能够实时地识别操作者在三维空间中手工搭建的积木装配作业,并操纵机械手在另外的环境中重现同样的作业,从而大大拓展了机器人的行为理解范围。另外,国吉等还展示了一个信息处理模型,它可以生成规划过程的形式描述有关行为理解、实施的信息处理模型,将迄今为止构成的观察和识别模型综合起来,说明行为的构造。这个模型需要生成的规划有两个:一个是按照顺序关系依次分析和整理出部分行为序列,据此构建对象物等级规划;另一个是关注行为各自造成哪些变化,分析其依存关系,整理关联行为,构建目标等级规划,此后再扩展到“根据观察的协调”和“模仿认知模型及功能扩展”方面。

迟内、末广等^[5]借助于视觉系统探索了物体之间约束关系的改变对装配作业带来的影响,在执行相同作业的机器人系统中实现了将诸如人类作业过程中作业位于什么位置(是否具有意义)这类所谓的动作的含意提取出来的功能。论文首先列举了多面体装配作业的例子,实施对象物之间的接触作业,着眼于运动约束,对面接触状态进行分类。其次,将作业对象物的状态变化和状态之间的转移动作组合起来,构建装配作业的作业模型。

从视觉系统得到对象物的位姿,在模型的基础上提取与环境的面接触状态,再展开成相应作业模型的动作模板,就能够构建一个执行同样装配作业的机器人系统。

图 4.3 给出作业对象物状态变化和组合状态之间的转移关系,图 4.3 显示了作业模型的根与干,这也是本系统的特点。论文限定对平移 3 个自由度的问题展开讨论。图 4.3 中的 $s;3,0,0$ 等符号,依次表示状态名、维持自由度(维持接触状态的运动自由度)脱离自由度(在接触减少方向上,使接触状态变化运动的自由度)和约束自由度(因接触而失去运动自由度)。它们之间存在这样的关系:全运动的自由度=约束自由度+维持自由度+脱离自由度。图 4.3 中位于最上部的 s 表示无接触的状态,如果接触状态不发生变化,在任何方向上均能移动(维持自由度=3),移动不会使接触状态发生变化(脱离自由度=0,约束自由度=0)。接下来, a 表示一个面处于接触状态,能在水平面内进行移动(维持自由度=2),向上的运动,即接触减少运动的自由度数为 1(脱离自由度=1),不存在因接触而丧失的自由度(约束自由度=0)。再往下,在 b 状态中,因为其处于上下两个面的夹持状态中,所以只能沿水平内移动(维持自由度=2),向上运动即接触减少的运动(脱离自由度=0),它因接触而丧失的自由度数为 1(约束自由度=1)。

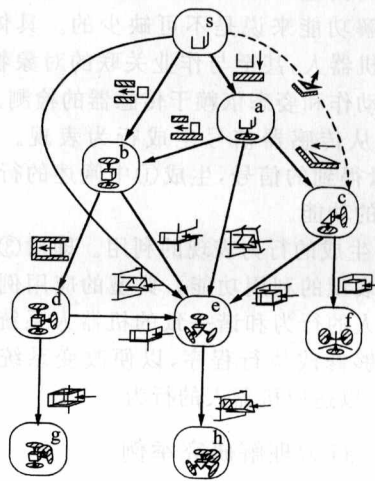


图 4.3 多面体物体装配的全状态及其转移

根据图 4.3 细节制定相应于组装/分解动作的模板后,就可以实现基于面接触的任意装配作业,进而构建作业模型了。在模型基础上生成动作识别,或者反过来生成机械手的控制规律。这篇论文通过观察人类的作业过程,从接触状态着手,找出构建的作业模型中所对应的状况,完成行为识别。再说得具体一些,就是先利用从测量数据所表达的对象物的位姿数据和对象物的几何模型信息(求平面方程式,再计算距离),检测处于何种接触状态;然后,依照作业模型,从观察结果中提取,或者根据几何模型进行推论,即可决定机器人控制所必需的控制参数;最后,将这些信息应用到实际机器人的动作中,便能完成把积木插入积木块这样的组合作业观察功能,实现机器人的具体执行任务了。这篇论文的新观点是指出使对象物之间接触状态发生变化是机器人技能的本质,而实现的关键在于掌握机器人究竟能够理解哪些技能。

4.2.3 行为理解的现状和未来

在机器人系统与人和谐一致地行动,或者适应作业目标和作业状况变化实施作业,或者与其他机器人系统配合协调作业的时候,上面介绍的行为理解功能都是不可缺少的。实际上,行为理解还具有科学层面的意义,从而更深入地理解人和机器人系统的行为。我们已经举例说明了上面的三种行为理解功能,不过它们都需要事先给出理解行为的模型。近年来,在行为理解功能方面,比较热门的研究课题开始转向从执行作业的信息直接生成行动模型的问题。这样的研究更接近智能的本质,从这种意义上看,它是今后一个值得发展的领域。

佐藤知正 森 武俊

4.3 视觉反馈控制

如果机器人是处于非结构环境内进行自主作业,那么视觉传感器往往不可缺少,因为借助于视觉能以非接触方式获得大量信息。在包含机器人的生产系统中,视觉也发挥着重要的作用。基于视觉传感器信息对机器人实施反馈控制,称为视觉反馈控制。大约从1990年开始,依据非线性系统理论的视觉反馈控制研究逐渐受到人们的关注。本节将阐

述视觉反馈控制与传统视觉信息识别的区别之处,并且对若干重要的研究进行讨论。关于视觉反馈控制的详细内容参见文献[10]、[14]、[15]、[17]等。

4.3.1 分级控制

如果机器人只借助于编码器、转速计之类的内部传感器信号实施控制,由于机构模型(与机器人机构相关的模型,如杆件长度、关节安装角度等)和环境模型(作业环境的模型,如对象物位置或障碍物位置等)存在不确定因素,任务执行结果往往会产生问题^{*}。因此,为了实施不确定环境下机器人的自主控制,借助于外部传感器对任务执行情况进行反馈就显得十分必要了。通常,内部传感器用于电机控制,而外部传感器用于手部轨迹生成,即构成如图 4.4 所示的分级控制。

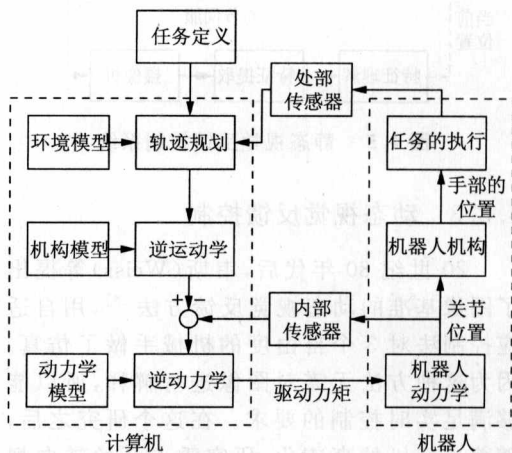


图 4.4 采用分级传感器的控制

视觉传感器是最基本的外部传感器,对视觉识别的研究(参见第4篇第1章)有着悠久的历史。不过,以往研究的焦点着重于复杂(自然的)场景的环境识别,在识别和理解上花费了很多时间,这对机器人实时控制来说并不适宜。反之,近年来有关视觉反馈控制的研究更关注动态环境(对象运动、照明条件变化的环境)下的实时控制,因此它的重点与视觉识别是有所区别的。总之,视觉反馈

* 这种情况称为“当模型具有不确定性时,基于内部传感器的机器人控制方法是非鲁棒的”。

控制不是理解作业环境后慢慢地发出动作的所谓“看,然后行动”的方法,而是一边观察作业对象物与手部之间的状态,同时做出反射性行动的所谓“边看边行动”的方法。

4.3.2 静态视觉反馈控制

视觉反馈控制最初期的研究文献为文献[27]。虽然说该研究是在积木世界中进行的,不过目标是完全自动化,而方法是将输入图像变换成线条画,然后加以解释,以达到从背景中截取物体完成位置识别的目的,为此视觉反馈需要花费许多时间。根据这个方法,在手臂开始进行动作之前,图4.5中的图像输入、特征提取(线条画的制成)、特征理解和轨迹规划的方框部分只执行一次,可见它不适合在动态环境下的作业。

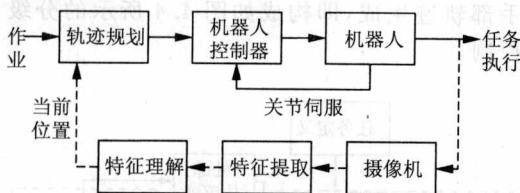


图 4.5 静态视觉反馈控制系统

4.3.3 动态视觉反馈控制

20 世纪 80 年代后,韦斯(Weiss)等提出了图像基准的动态视觉反馈方法^[28],用自适应控制法对 3 个自由度的机械手做了仿真。因为这种方法无需对图像进行解释,所以能够满足实时控制的要求。在这个研究之后,随着计算机的高速化,研究重点开始转向把视觉传感器嵌入反馈回路中的动态方法(即所谓的视觉伺服方法)。根据目标值输入法的不同,视觉伺服方法又大致分为位置基准法和特征基准法两类。

1. 位置基准法

在位置基准法中,伺服系统的目标值输入是由物体与手部(或摄像机)的相对位置和姿态(图 4.6)给出的。从来自摄像机的图像计算物体的三维位置和姿态,然后对机器人实施控制。可见这是传统静态视觉反馈控制方法的自然扩展。对于位置基准法而言,机器人控制系统就是通常的位置控制系统,它所关注的主要研究课题是噪声的鲁棒性,以

及高速位置和姿态的检测方法。例如,用到卡尔曼滤波器^[29]、AR 模型^[19]、GPC^[9]等滤波的方法,以及立体法^[26]、光流场法^[1]和高速视觉^[23]等方法。

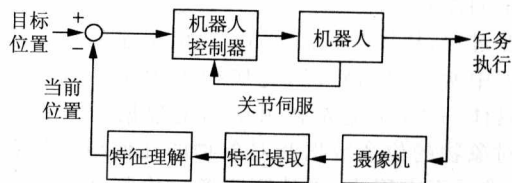


图 4.6 位置基准视觉伺服系统

2. 特征基准法

特征基准法又称为图像基准法,是将图像上的特征量进行反馈的一种控制方法(图 4.7)。所谓特征量,是指表示物体图像特征的量,如图像区域的面积、中心位置、线段长度和斜率等,不必对图像理解加以解释,凭借简单的前处理即可得到它们(图 4.8)。伺服系统的目标输入由特征量给定,然后将其与从图像提取的特征量相减,其差值用来驱动机器人。这个方法具有下列特征:①因不需要图像的解释,故速度快;②不必计算物体或手部的位,不会受物体模型和机器人机构学模型不正确性的影响;③如果采用 teach-by-showing* 方法生成目标值,甚至不需要环境模型等。

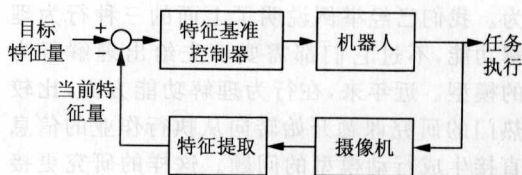


图 4.7 韦斯的特征基准视觉伺服系统

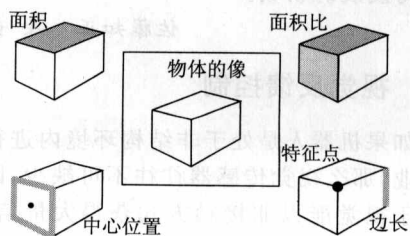


图 4.8 特征量的例子

* 实际上,这是一种把摄像机置于目标位置记忆图像,并将此作为目标图像的一种方法。

为了从特征量生成机器人的轨迹,需要用到图像的雅可比矩阵。图像雅可比矩阵定义为手部位姿的微小变化下特征量变化之比。设特征量向量为 ξ ,手部位姿和姿态为 p ,图像的雅可比矩阵定义为

$$J_{\text{image}} = \frac{\partial \xi}{\partial p} \quad (4.9)$$

J_{image} 为方阵(意味着手部自由度与特征量的数目相同),如果它的逆矩阵存在,当手部向特征量偏差减小的方向移动时,显然有

$$\dot{p} = J_{\text{image}}^{-1} (\xi_d - \xi) \quad (4.10)$$

由此得知特征量将向目标值 ξ_d 逼近。其后,利用通常的手指坐标系控制方法来实现 \dot{p} 的控制即可。韦斯的特征基准法并未采用关节伺服,视觉反馈必须以极高的速度执行,因此借助于文献[18]中的高速视觉系统就显得很必要。

为了解决采样周期问题,费德马(Fedema)等提出在图像采样周期内,生成连续特征量轨道,在关节伺服系统进行插值的方法^[8](图4.9)。此外,也有人提出借助于卡尔曼滤波器^[3]、自调整调节器^[25]和观测器^[11]等对采样间隔进行插值的方案。

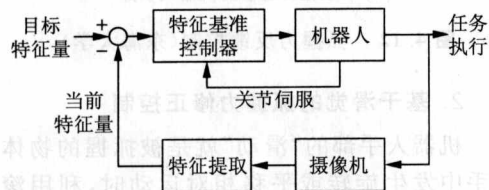


图 4.9 特征基准视觉伺服系统

关于围绕特征基准法所开展的各项研究,以及特征基准法与位置基准法的比较,请读者参见文献[10],[14]。

3. 混合法

在物体形状模型和机器人机构学模型带有不确定性的场合,特征基准法具有鲁棒性。但是它存在一个严重的问题,即稳定域是局部的^[2,16],所以现在人们在寻求在大范围内稳定的控制方法。其中,十分值得关注的有以特征基准切换目标图像的方法^[13,16]、图像空间中的路径规划方法^[5,12]、将旋转和平移进行分解以避免局部最小值的方法^[4,6,7]与位置基准法融合^[20]的方法,以及进而把位置基准下的路径规划变换到图像空间(或者说把图像

空间内的路径规划变换到关节空间)的方法^[21,22,24]等。这些方法,既无法完全与迄今讨论的位置基准对号,也无法与特征基准对号,所以称之为混合法,对它们的研究正方兴未艾。

桥本浩一

4.4 触觉反馈控制

应用触觉高级的目的在于提高机器人的灵巧性^[1]。灵巧性中有控制的灵巧性、机构的灵巧性两种,前者如根据触觉信息,可以在适当的时机实现机器人手臂或钳形手部的位置力控制^[2]。与此不同,后者用来实现多臂协调控制和多指多关节手的抓握与操作控制。

4.4.1 触觉顺序控制

1. 基于接触觉的探索控制

将触觉传感器安装在机器人手部的各个部位上,检测它与对象物或障碍物之间的接触情况,这种基于接触信号的机器人控制,是智能机器人初期研究阶段常用的基本方法^[3],例如,用机器人手臂实现物体的探索控制,移动机器人的迷宫路径探索和障碍物的回避等。在实际应用方面,例如用于确认工业机器人是否抓握或者捕捉,以及是否接触障碍物等后立即采取非正常停止措施等场合。

如图4.10(a)所示,考虑控制机器人手臂探索物体时触觉传感器在机器人手部各个部位的安装情况,规定逻辑信号为 T_{fl} 、 T_{fr} (分别对应左、右指的指尖), T_{ol} 、 T_{or} (分别对应左、右指的外侧)。设直角坐标系中机器人的运动方向为 x 、 y ,移动速度的控制命令为 V_x 、 V_y ,移动距离的命令为 D_x 、 D_y 。针对任意位

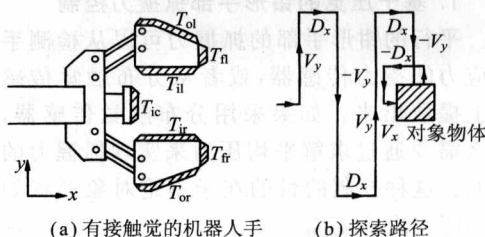


图 4.10 基于接触觉的逻辑控制

置的物体实施探索和抓握的顺序动作如图 4.10(b)所示,在完成对物体的抓握之前,需要反复进行探索。

2. 基于力觉的插入装配顺序控制

“插入装配作业”是指借助于 3 轴力觉传感器的信息,把圆柱形零件插入带有微小间隙的圆柱孔穴的作业,它是触觉传感器控制的典型例子。图 4.11 表示了这种方法的一个示例^[4]。这种控制首先在 Z 方向上施压让零件趋近圆孔,零件抵触到圆孔的孔口后,如果左、右方向上的应力大于门限值,则产生修正动作,使应力减小,然后沿 Z 方向把零件插入圆孔内。X、Y 方向上的修正动作依靠与应力的成比例的反馈产生。

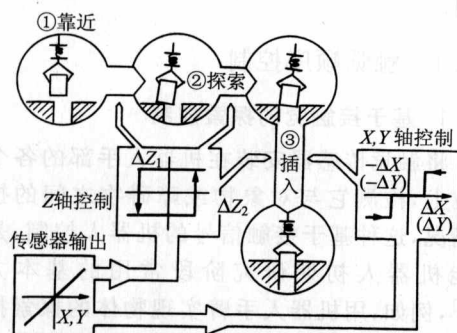


图 4.11 基于力觉的插入装配顺序控制^[4]

3. 基于接触觉的移动机器人控制

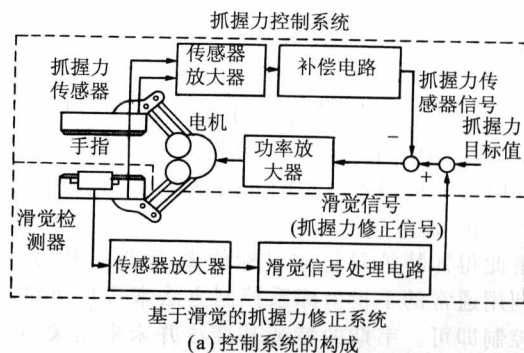
在机器人的前后左右安装带有缓冲器的触觉传感器,或者安装光学式接近传感器,就能够实现迷宫路径探索和障碍物回避一类路径控制任务。如果是多足机器人,那么安装在脚掌上的触觉传感器可以用来区分脚掌完全离地状态、完全着地状态,或者踏上台阶的状态,为实施步行控制提供信息。

4.4.2 触觉反馈控制

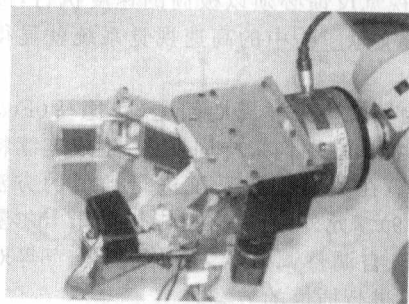
1. 基于压觉的钳形手部抓握力控制

平行的钳形手部的抓握力可以从检测手指应力的指力传感器,或者从分布触觉传感器上提取出来。如果采用分布触觉传感器,那么需要通过求解平均压力来实现抓握力的控制。这种控制的目的在于不论对象形状如何均能实现稳定抓握。在图 4.12(a)中,抓握信号在补偿电路中经过运算后被反馈回来^[5]。典型的运算是所谓的 PID 补偿,其中 P

元素用来调整抓握力,I 元素用来实现零加压力状态,D 元素则用来消除过调(即冲击力)。图 4.12(b)给出了带触觉传感器的机器人手部的实例。



基于滑觉的抓握力修正系统
(a) 控制系统的构成



(b) 带触觉传感器的机器人手部

图 4.12 抓握力反馈控制(东海大学)

2. 基于滑觉的抓握力修正控制

机器人手部的“滑动”就是被抓握的物体在手中发生旋转或平移相对运动时,利用滚珠和滚柱在旋转或滑动时产生的振动检测滑动的传感器,被称为“滑觉传感器”^[7]。这种传感器可以用于动作的控制,如防止物体滑动的控制、伴随滑动的接触作业、抓取不同表面物性的布料等。

可以看出,为了实现抓握控制,滑动传感器的信息被输入位于图 4.12(a)下方的滑动信号处理电路方框中,由此求出需要的抓握力信号。其结果导致抓握力目标值被修正,达到控制最佳抓握力^[6]的效果。图 4.12(b)给出了带触觉传感器的机器人手部实例,它用滚珠来实现滑觉。

3. 基于接近觉的手臂仿形控制

所谓“接近觉”,就是机器人接近对象时,检测与对象之间的距离和相对倾角的传感器。在图 4.13 中,接近觉传感器设置在机器

人手部的前端,它可以检测出距离 l 、相对角度 α 和 β 。基于接近觉反馈控制,机器人手部前端能够完成如图4.13(a)所示的曲面 θ 与平面 π 的交线的追踪任务。

仿形作业的条件应该满足以下三项要求:

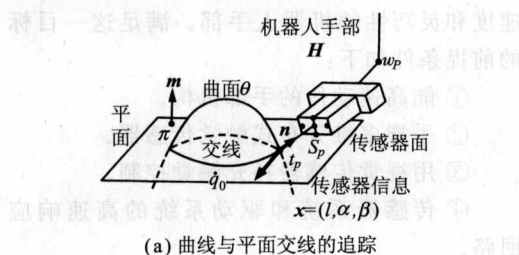
① 机器人手部前端始终与对象物表面保持一定间距,而且对象物表面的法线 n 与机器人手部的方向一致。

② 让机器人手部方向所确定的目标点 t_p 以一定的速度沿着交线进行运动。

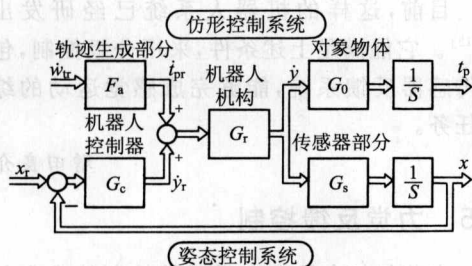
③ 能对偏离交线的错位进行修正。

满足以上功能的控制系统如图4.13(b)所示,它是由姿态控制系统与仿形控制系统组合而成。

设接近信号为6轴力觉信号,那么就可以实现所谓的跟踪接触型仿形控制,其特点是手部机器人在接触对象的同时还向其施加一定压力。



(a) 曲线与平面交线的追踪



(b) 自主仿形控制系统的构成^[5]

图 4.13 接近觉反馈控制

4.4.3 基于触觉传感器的灵巧性的实现

1. 基于压觉的自适应抓握控制

如果针对机器人手部系统建立抓握系统的响应模型,那么通过参数调整就能实现自适应控制,满足各种响应特性的要求。

图4.14给出了自适应控制系统的组成。图4.14(a)给出了手部和对象物体的黏弹性

模型,图4.14(b)是模型规范型自适应控制系统的方框图。图中采用跟踪规范模型响应的自适应准则构建可变反馈系统,实现了相同的抓握动作^[8]。

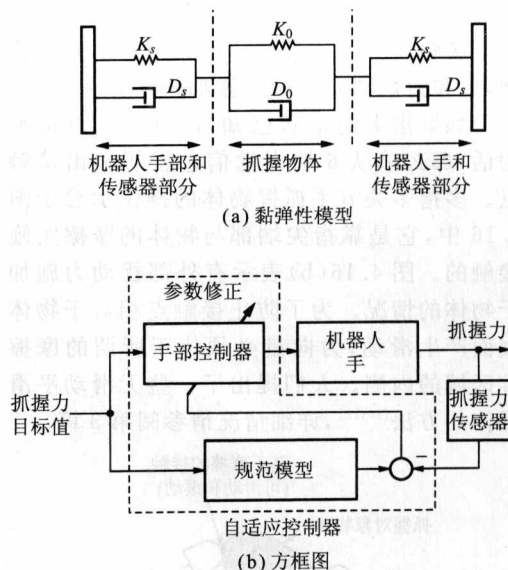


图 4.14 压觉自适应控制

2. 基于触觉的不定形物体的整形控制

目前,机器人手部控制系统已经能够现实把不定形物体(如黏土等具有可塑性的物体)整形成球体或立方体等形状的操作^[9]。整形机构采用由两根相对手指的手和带手掌的手组成,它们首先根据分布式触觉传感器、抓握力觉传感器、手间距离传感器的信息对黏土的黏弹性进行识别,再对形状的整形程度进行测量,同时对压紧力和手间距离实施自适应控制。图4.15给出了由2个自由度水平多关节手臂和掌形手部(有上、下两个)组成的黏土整形系统。



图 4.15 基于触觉的不定形物体的整形控制(东海大学)

3. 基于多维触觉的多指多关节抓握与操作

要实现多指多关节手对物体的稳定抓握操作,各根手指的角度信息、接触位置信息,以及加在手指上的力和力矩信息是十分必要的。接触位置靠指尖的分布触觉传感器检测,力和力矩则靠6轴传感器进行检测。

如果指尖的形状已知,而且是单点接触的话,那么单从6轴力觉信息就能求出接触点。多指多关节手抓握物体的操作示意于图4.16中,它是靠指尖端部与物体的摩擦实施接触的。图4.16(b)表示有外部扰动力施加于物体的情况。为了防止接触点相对于物体表面产生滑动,力向量必须位于所谓的摩擦锥区域的内侧。人们提出了一些无滑动平滑操作的方法^[10,11],详细情况请参阅第3篇。

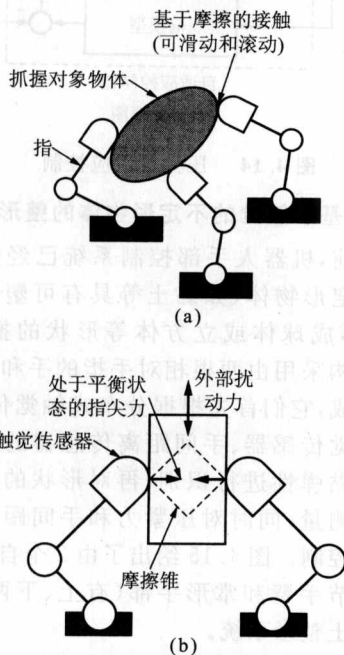
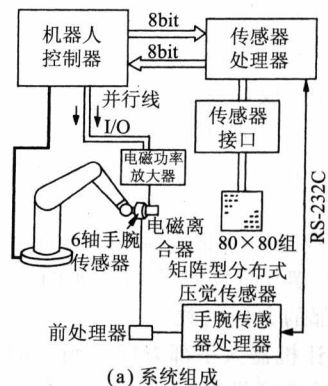


图 4.16 基于多指手的操作^[10]

4.4.4 多触觉传感器控制

1. 触觉前馈控制

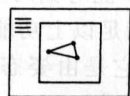
图4.17给出一个典型的例子,解释触觉前馈控制的方法。对象物被置于覆盖在作业平面上的矩阵型触觉传感器之上,采用前馈的方法进行控制,即测量和识别对象物的形状,向机器人下达位置和姿态指令值,靠前馈控制实施处理作业。



(a) 系统组成



(b) 分布式压觉传感器和对象物



(c) 显示图形

图 4.17 传感器反馈控制

2. 视觉/触觉融合控制

触觉反馈的最终目标是实现与人类同等速度和灵巧性的机器人手部。满足这一目标的前提条件如下:

- ① 能高速动作的手部机构。
- ② 手指多维分布式触觉传感器。
- ③ 用视觉传感器补充触觉控制。
- ④ 传感器系统和驱动系统的高速响应回路。

目前,这样的机器人系统已经研发出来^[12]。它能满足上述条件,采用分级控制,包含传感器反馈系统,能够完成感觉运动的综合任务。

增田良介

4.5 力觉反馈控制

本节仅仅介绍在力觉反馈控制技术中与传感器高级应用相关的内容。力觉领域里一项重要的技术叫做触感技术,是指感知机器人手部的某一部分与对象物接触的技术。目前,虽然借助于导电橡胶、压电元件、感压半导体做成分布式传感器使研究取得了一些进展,但是真正解决触感技术仍然是一件困难的事情。本节将介绍机器人借助于6轴力传感器与对象物接触来计算接触点及接触力的算法。算法说明,不采用专门的触感传感器,借助于安装在手腕等处的6轴力传感器也能

实现触感技术。

4.5.1 接触点的检测算法

在图 4.18 中,设力 f 作用于点 P,如果能够决定作用点 P 的位置,那么虚拟触感算法也就可以实现。把 6 轴力传感器配置在图的原点上,设作用点 P 的位置向量为 L ,作用力为 f ,由 6 轴力传感器测得的 3 个轴向力分量为 $F=(F_x, F_y, F_z)^T$,围绕 3 个轴的力矩为 $M=(M_x, M_y, M_z)^T$,则下列关系成立:

$$F=f \quad (4.11)$$

$$M=L \times f \quad (4.12)$$

从式(4.11)和式(4.12)中消去 f ,得到下式:

$$M=L \times F \quad (4.13)$$

从式(4.13)中求解 L ,则未知作用点的位置由下式给出:

$$L=\frac{F \times M}{|F|^2}+\alpha F \quad (4.14)$$

式中,若设

$$L_0=\frac{F \times M}{|F|^2} \quad (4.15)$$

则可以得到下式:

$$L=L_0+\alpha F \quad (4.16)$$

式中, $|F|$ 为向量 F 的范数; $F \times M$ 为向量的外积; α 为标量常数。正如式(4.16)所示,由于 α 可取任意的值,故仅从力传感器信息无法确定 L 。常数 α 是由机器人与对象物接触的探头部分的形状决定的。至于各个向量之间的关系,由式(4.13)可知, F 与 M 正交,由式(4.15)可知, L_0 与 M 、 L_0 与 F 彼此正交,因此 L_0 、 M 和 F 分别正交。

接下来求参数 α 。根据探头形状的定义,

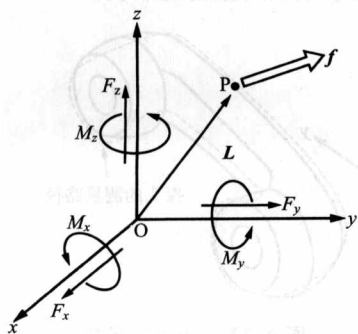


图 4.18 坐标系与向量的关系

可以由几何学条件求出 α 。

利用位置向量 L ,可以按照如下形式定义探头的方程式。

$$G(L)=0 \quad (4.17)$$

将式(4.16)代入式(4.7),得到

$$G(L_0+\alpha F)=0 \quad (4.18)$$

根据式(4.18), α 由参数 L_0 和 F 以及探头的几何学约束条件 G 决定。

在说明具体解法之前,我们先来看一下 α 的结构。设探头上的一点 $r=r_0$ 已知,当有外力 f 作用时,由式(4.14)得到

$$r_0=\frac{F \times M}{|F|^2}+\alpha F \quad (4.19)$$

又由式(4.13)得到下列关系:

$$M=r_0 \times F \quad (4.20)$$

将式(4.20)代入式(4.19),则式(4.19)右端第一项可以写成下列形式:

$$\frac{F \times M}{|F|^2}=r_0-\left(\frac{(r_0, F)}{|F|^2}\right)F \quad (4.21)$$

式(4.21)中, (r_0, F) 为内积。若把式(4.21)代入式(4.19)中,得到下列关系:

$$r_0=r_0+\left(\alpha-\frac{(r_0, F)}{|F|^2}\right)F \quad (4.22)$$

由此关系式,可按照如下形式求出 α :

$$\alpha=\frac{(r_0, F)}{|F|^2} \quad (4.23)$$

在式(4.23)中包含未知的 r_0 。实际上,在求解 α 的时候, r_0 取非显含形式是必要的。求解 α 时,必须具体定义探头的几何学形状。

下面取两种具体的探头形状作为例子,讲述参数 α 求解的过程。

【例题 1:半球面探头】

图 4.19 表示了半径 R 的半球面探头,根据几何学约束条件,它的方程式以如下形式给出:

$$|L|^2=R^2 \quad (4.24)$$

将式(4.16)代入式(4.24)中,求得

$$|L_0+\alpha F|^2=R^2 \quad (4.25)$$

展开式(4.25),得到关于 α 的二次方程式

$$|F|^2 \alpha^2+2(L_0, F) \alpha+|L_0|^2-R^2=0 \quad (4.26)$$

由上述方程式解出 α ,得到下列求解结果:

$$\alpha=\frac{-(L_0, F) \pm \sqrt{(L_0, F)^2-|F|^2(|L_0|^2-R^2)}}{|F|^2} \quad (4.27)$$

因为 L_0 与 F 正交, $(L_0, F) = 0$, 故 α 可以表示如下:

$$\alpha = \frac{\pm \sqrt{(R^2 - |L_0|^2)}}{|F|} \quad (4.28)$$

如图 4.19 所示, 按照半球面的选取方向来确定 α 的正、负符号。

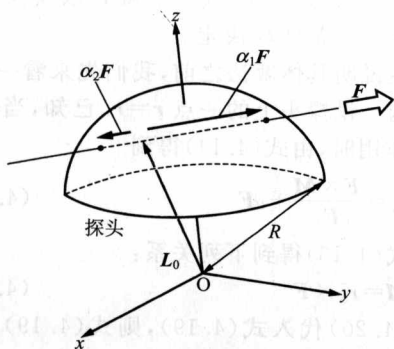


图 4.19 半球面探头的示意

【例题 2: 棒状探头】

设棒状探头的方向向量为 e , 于是图 4.20 中表示的棒状探头的几何学约束条件有如下关系:

$$L_0 + \alpha F = \beta e \quad (4.29)$$

式中, β 为常数。式 (4.29) 可以写成以 α, β 为未知数的联立方程式。根据联立方程式的解法可知, 未知数为 2 的方程式无法求解 3 个未知数, 于是求解 α 的问题应该归结为求解参数使如下评价函数 J 取最小值的问题:

$$J = |L_0 + \alpha F - \beta e|^2 \quad (4.30)$$

采用最小二乘法求参数 α , 得到下式^[1]:

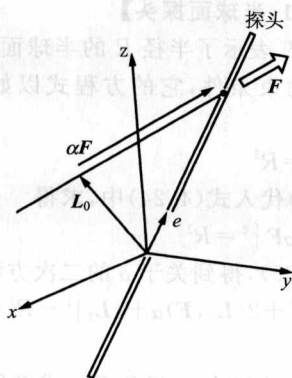


图 4.20 棒状探头的示意

$$\alpha = \frac{(L_0, F)|e|^2 - (L_0, e)(F, e)}{|F|^2|e|^2 - (F, e)^2} \quad (4.31)$$

式中, 考虑到条件 $(L_0, F) = 0$, 于是有

$$\alpha = \frac{-(L_0, F)(F, e)}{|F|^2|e|^2 - (F, e)^2} \quad (4.32)$$

根据以上算法, 可以决定参数 α , 所以能确定式 (4.16) 中作用点 P 的位置向量 L 。本算法只需要借助于 6 轴力传感器即可求出作用点的位置和力, 从而实现虚拟触感技术。

4.5.2 对象物形状测量

下面介绍触感技术在对象物形状测量中应用的例子。在图 4.21 中, 6 自由度多关节机械手的前端安装有 6 轴力传感器, 而传感器的前端又固定着棒状探头。

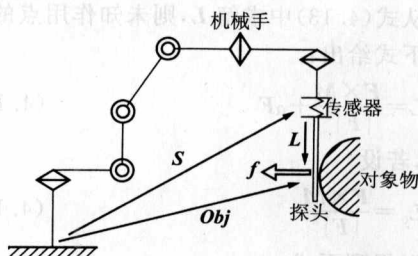


图 4.21 形状识别系统的概况

被测对象物表面的位置向量 Obj 可以用机械手前端力传感器的位置向量 S 和传感器到物体的向量 L 之和表示。指向力传感器的位置向量 S 由机械手的机构来决定。从传感器到物体的向量 L 用式 (4.32) 中的参数 α , 通过式 (4.16) 确定。

被测对象物的形状应该有一定的复杂程度, 故列举如图 4.22 所示的电话机话筒为例。图 4.23 中给出了测量结果, 说明依照本算法即可识别出对象物的形状。

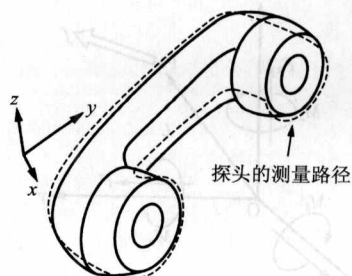


图 4.22 识别对象物



图 4.23 识别结果

4.5.3 考察与小结

上面举了一个形状识别的例子,该例子与本节力觉反馈控制的应用示例有所不同。本方法可以扩展到力觉反馈控制中。以金属电线杆子为例,它的两个面都有螺栓孔,考虑用机器人将螺栓从两面的孔中穿过的作业,在插入螺栓的同时,利用本算法检测接触位置,通过改变螺栓的插入方向,螺栓就能够顺利地穿过两个面上的孔洞。类似的例子同样说明,本算法很简单,其适用范围相当广泛。

荻田哲郎

参考文献

- 4.1 传感器融合
- [1] 石川正俊: センサフュージョンシステム—感覚情報の統合メカニズム—, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.3 (1988) pp.251-255
- [2] B. V. Dasarathy: Sensor fusion potential exploitation-Innovative architectures and illustrative applications, Proc. of the IEEE, Vol.85, No.1 (1997) pp.24-38
- [3] T. C. Henderson and E. Shilcrat: Logical sensor systems, Journal of Robotics Research, Vol.1, No.2 (1984) pp.169-193
- [4] 山崎弘郎, 石川正俊編著: センサフュージョン—実世界の能動的な理解と知的再構成—, コロナ社 (1992)
- [5] Ren C. Luo and M. G. Kay: Multisensor integration and fusion in intelligent systems, IEEE Trans. SMC, Vol.19, No.5 (1989) pp.901-931
- [6] Ren C. Luo and K. L. Su: A Review of High-Level Multisensor Fusion: Approaches and Applications, Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (1999) pp.25-31
- [7] 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会 (1982)
- [8] H. F. Durrant-Whyte: Integration, Coordination and Control of Multi-Sensor Robot Systems, Kluwer (1988)
- [9] 加藤寛一郎: 最適制御入門, 東京大学出版会 (1987)
- [10] 長田茂美, 増本大器, 山川宏, 木本隆: ニューラルネットによる感覚運動融合の階層型モデル, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5 (1994) pp.685-694
- [11] S. Brandt: Statistical and Computational Methods in Data Analysis, North-Holland Publishing Company (1970)
(邦訳) 吉城肇, 高橋秀知, 小柳義夫訳: データ解析の方法 数理統計学とコンピュータ, みすず書房 (1976)
- [12] P. K. Allen: Integrating vision and touch for object recognition tasks, Journal of Robotics Research, Vol.7, No.6 (1989) pp.15-33
- [13] K. Umeda et al.: Measurement of 3D Shape Parameters for Hand-eye Cooperation System by Fusing Tactual and Visual Data, Proc. 1999 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (1999) pp.996-1001
- [14] 向井利春, 石川正俊: アクティブセンシングを用いた視触覚融合システム, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1 (1997) pp.75-81
- [15] 板根茂幸, 石川友彦, 佐藤知正: 視覚と力覚のセンサフュージョンによる把持物体の接触位置の推定, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5 (1994) pp.677-684
- [16] M. Kam, X. Zhu and P. Kalata: Sensor fusion for mobile robot navigation, Proc. of the IEEE, Vol.85, No.1 (1997) pp.108-119
- [17] 浅田稔: センサ統合とコンピュータビジョン, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6 (1990) pp.743-749
- [18] K. Umeda, K. Ikushima and T. Arai: 3D Shape Recognition by Distributed Sensing of Range Images and Intensity Images, Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1997) pp.149-154
- [19] 特集 センサ情報の統合, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6 (1990) pp.721-774
- [20] 特集 センサフュージョン, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5 (1994) pp.645-728
- [21] Special issue on sensor data fusion, Journal of Robotics Research, Vol.7, No.6 (1989) pp.2-161
- [22] Special issue on data fusion, Proc. of the IEEE, Vol.85, No.1 (1997) pp.3-180
- [23] Special issue on sensor fusion, Journal of Optical Engineering, Vol.35, No.3 (1996) pp.603-721; Vol.36, No.3; Vol.37, No.2 にも同様の特集
- 4.2 行為理解
- [1] S. Hirai and T. Sato: Motion Understanding for World Model Management of Telerobot, 5th Int. Sym. on Robotics Research, MIT Press (Aug. 1989)
- [2] 平井成興, 佐藤知正: テレロボットにおけるワールドモデル管理のための操縦行動の理解機能, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.6 (1989) pp.714-724
- [3] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: Learning by watching: Extracting reusable task knowledge from visual observation of human performance, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, No.6 (1994) pp.799-822
- [4] 國吉康夫, 井上博允, 稲葉雅幸: 人間が実演して見せる作業の実時間視覚認識とそのロボット教示への

- 応用, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3 (1991) pp.35-43
- [5] 池内克史, 末廣尚士: 視覚による組み立て作業理解のための作業モデルとそれに基づく動作生成, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2 (1989) pp.281-290
- #### 4.3 視覚反饋控制
- [1] P. K. Allen, A. Timcenko, B. Yoshimi and P. Michelman: Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.9, No. 2 (1993) pp.152-165
- [2] F. Chaumette: Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing, In (eds. D. J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse), The Confluence of Vision and Control, Springer-Verlag, London (1998) pp. 66-78
- [3] P. I. Corke and M. C. Good: Controller Design for HighSpeed-Performance Visual Servoing, 12th IFAC World Congress, Vol.9, Sydney, Australia (1993) pp.395-398
- [4] P. I. Corke and S. Hutchinson: A New Hybrid Image-Based Visual Servo Control Scheme, Proc. 39th IEEE Conf. on Decision and Control, Sydney, Australia (2000) pp.2521-2526
- [5] N. J. Cowan and D. E. Koditschek: Planar Image Based Visual Servoing as a Navigation Problem, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Detroit, Michigan (1999) pp.611-617
- [6] 出口光一郎, 石山塁: 画像ベースド視覚サーボにおける並進と回転の非干渉化によるロボットの最適軌道制御, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5, (1999) pp.720-727
- [7] K. Deguchi: Optimal Motion Control for Image-Based Visual Servoing by Decoupling Translation and Rotation, IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, Victoria (1998) pp.705-711
- [8] J. T. Feddema, C. S. G. Lee and O. R. Michell: Automatic Selection of Image Features for Visual Servoing of a Robot Manipulator, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Scottsdale, Ariz (1987) pp.832-837
- [9] J. A. Gangloff, M. de Mathelin and G. Abba: 6 DOF High Speed Dynamic Visual Servoing using GPC Controllers, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Leuven, Belgium (1998) pp.2008-2013
- [10] 橋本浩一: 視覚フィードバック制御—静から動へ, システム／制御／情報, Vol.38, No.12 (1994) pp. 659-665
- [11] 橋本浩一, 木村英紀: ビジュアルサーボイング—非線形オブザーバアプローチ, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.7 (1995) pp.986-993
- [12] 橋本浩一, 田中浩平, 則次俊郎: 画像平面における経路計画, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集 (2000) pp.885-886
- [13] 橋本浩一, 田中浩平, 則次俊郎: 視覚サーボにおけるポテンシャル切り替え制御, 計測自動制御学会論文誌, Vol.36, No.8 (2000) pp.660-667
- [14] 橋本浩一: ビジュアルサーボにおける予測と感度, 計測と制御, Vol.40, No.9 (2001) pp.630-635
- [15] K. Hashimoto (ed.): Visual Servoing—Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback, World Scientific, Singapore (1993)
- [16] K. Hashimoto and T. Noritsugu: Potential Switching Control in Visual Servo, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, Calif. (2000) pp.2765-2770
- [17] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke: A tutorial on visual servo control, Trans. on Robotics and Automation, Vol.12, No.5 (1996) pp.651-670
- [18] I. Ishii, Y. Nakabo and M. Ishikawa: Target Tracking Algorithm for 1 ms Visual Feedback System using Massively Parallel Processing Vision, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1996) pp.2309-2314
- [19] A. J. Koivo and N. Houshangi: Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.21, No.1 (1991) pp.134-142
- [20] E. Malis, F. Chaumette and S. Boudet: 2-1/2-D visual servoing, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.15, No.2 (1999) pp.238-250
- [21] Y. Mezouar and F. Chaumette: Path Planning in Image Space for Robust Visual Servoing, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, CA (2000) pp.2759-2764
- [22] Y. Mezouar and F. Chaumette: Design and Tracking of Desirable Trajectories in the Image Space by Integrating Mechanical and Visibility Constraints, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seoul, Korea (2001) pp.731-736
- [23] A. Namiki, Y. Nakabo, I. Ishii and M. Ishikawa: High Speed Grasping using Visual and Force Feedback, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1999)
- [24] H. Noborio and Y. Nishino: Image-based Path-planning Algorithm on the Joint Space, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Seoul, Korea (2001) pp.1180-1187
- [25] N. Papanikolopoulos and P. K. Khosla: Adaptive robotic visual tracking: theory and experiments, IEEE Trans. Automatic Control, Vol.38, No.3 (1993) pp.429-445
- [26] A. Rizzi and D. E. Koditschek: Progress in Spatial Robot Juggling, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Nice, France (1992) pp.775-780
- [27] Y. Shirai and H. Inoue: Guiding a robot by visual feedback in assembly tasks, Pattern Recognition, Vol.5 (1973) pp.99-108
- [28] L. E. Weiss, A. C. Sanderson and C. P. Newman: Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback, IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.5 (1987) pp.404-417
- [29] D. B. Westmore and W. J. Wilson: Direct Dynamic Control of a Robot using an End-point

Mounted Camera and Kalman Filter Position Estimation, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Sacramento, Calif. (1991) pp.2376-2384

4.4 触觉反馈控制

- [1] S. T. Venkataraman and T. Iberall: Dextrous Robot Hands, Springer-Verlag (1990)
- [2] 増田: 触覚によるロボットアーム・ハンドの制御, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.5 (1984) pp.87-90
- [3] 井上: 論理機械によって制御される人工の手, 計測と制御, Vol.7, No.12 (1968) pp.839-844
- [4] Goto et. al: Insert Operation by Tactile Controlled Robot HI-T-Hand Expert-2, Proc. 4th ISIR (1974) pp.209-218
- [5] 長谷川, 増田: 基礎ロボット工学 (制御編), 昭光堂 (1994)
- [6] 増田ほか: 工業ロボットのすべり覚とその応用, 電気学会論文誌C, Vol.96, No.10 (1988) pp.9-16
- [7] 山田ほか: ロボットハンドのための指紋を備えた高周波微振動検出式滑り覚センサ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.36, No.6 (2000) pp.473-480

- [8] 福田ほか: 対象物の動特性を考慮したグリップの適応ハイブリッド力制御方式, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.2 (1988) pp.3-12
- [9] 佐々木, 増田: 力覚と分布触覚を用いたロボットハンドによる不定形物体の整形制御, 電気学会論文誌, Vol.115-C, No.10 (1995) pp.1103-1108
- [10] 前川: 触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6 (2000) pp.776-781
- [11] H. Maekawa and K. Tanie: Tactile feedback for multifingered dynamic grasping, IEEE Control Systems, Vol.17, No.1 (1997) pp.63-71
- [12] A. Namiki and M. Ishikawa: Optimal Grasping using Visual and Tactile Feedback, Int. Conf. On Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (1996) pp.589-596

4.5 力覚反馈控制

- [1] T. Tsujimura and T. Yabuta: An object detection by tactile sensing method employing force/torque information, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.5, No.4 (1989) pp.444-450

第5章 规划

规划(planning)是机器人系统最基本的功能,因为在机器人要做任何行为之前,事先必须制定相应的规划。因此,不论是1990年出版的《机器人技术手册》,还是本次新版的手册,一如既往地都要涉及这个本质问题。不同的是,在这10年间,有关规划的研究取得了长足的进展,各种各样的新方法被开发出来。在1990年版的《机器人技术手册》中,规划大致被分为作业规划和行动规划两类。前者涉及制定机器人实际执行任务时的作业顺序,而后者则涉及实际执行规划好的作业顺序时手和足的动作顺序。也就是说,前者属于上层概念,而后者则属于实现上层概念时需要完成的下层概念。

但是,在“制定”上述两层规划的过程中所采用的状态描述法或目标搜索法,它们的共同概念多数都是相同的。在机器人技术手册的新版本中,我们将仍然延续这种观点,姑且避免涉及具体对象的行动模式,先讨论一些更为基本和抽象的概念。

1990年版的《机器人技术手册》曾对“问题解决”这个与作业规划紧密相关的话题进行了阐述,这是人工智能的核心课题,在本章5.1节的“符号处理与推理”中将重点地对它加以讨论。在本章5.2节“学习”中,针对近年来取得显著进展的机器人的行为学习问题,根据最新的成果,分成四种学习方法加以讨论。有人认为,“用逻辑的方法研究机器人这类以现实世界为对象的系统存在难以逾越的障碍”,为了解决这个问题,本章5.3节的“软计算”相当详细地介绍了几种从数理性角度解决的方法。与1990年的版本相比,本章5.2节和5.3节可能会让人感到耳目一新。5.4节的“算法理论的行动规划”与5.5节的“试探的行动规划”是互为补充的内容。详细地说,为了避免机械手或移动机器人等移动体在移动中与其他固定障碍物或移动障碍物发生冲突,5.4节从理论方面对运动路径计算

的复杂程度做出了评价,而5.5节则采用试探法(启发的知识),这种方法虽然未必有绝对成功的把握,但在多数情况下却很有效,可望成为一种实用的方法。

在这两节中,对包括1990年版在内的内容进行了修订,以概念为中心展开论述,并且补充了最近提出的新的见解。本章的5.6节“作业规划与偏差校正”可以认为是1990年版中4.3.1节“作业规划”的展开,在补充了有关偏差校正的内容后这一节的内容看上去有了一些新意。以上各节的内容都与机器人行动的基础知识有关,所以在每一节标题下面的子标题难免会发生重复,不过为了方便读者挑选每一节独立地进行阅读,即使在子标题上有一些重复也无妨。

柿仓正义

5.1 符号处理与推理

5.1.1 人工智能

把人类的智能赋予计算机而开展的研究(或者说围绕计算机开发智能的研究工作)称为人工智能(AI: Artificial Intelligence)。计算机被发明出来后不久,大约在1950年前后,人们便启动了人工智能的研究,人工智能这个术语,是在1956年的达特茅斯会议上问世的(由McCarthy亲自命名)。

计算机原本是以高速数值计算为目的研制的,研制成功后人们发现,计算机还能处理非数值的符号运算,由此让人联想到,既然人类的推理活动也涉及词语和概念等符号处理,那么能否让计算机也像人那样进行推理活动呢?于是就展开了人工智能的研究。可以认为,人工智能研究是在“处理符号即推理”的前提(Newell称之为物理符号系统假设^[1])下起步的,至于研究者在当初是否真正意识到这一点则另当别论,

人工智能系统的特征在于启发式法的存在。所谓启发式法,就是“虽然不是普遍成

立,但在大多数场合成立的经验法则”。例如,“晚霞红,早霞晴”就是从启发中得出的知识。人间世事几乎所有的学问可以说都是源于启发式法。

5.1.2 问题的解决

为探索解决方法未知的问题而开展的策略研究属于人工智能中问题解决这一概念的范畴。问题解决的求解方法通常是利用探索法,从各种可能的组合(称为解空间)中探寻期望的答案。

1. 问题的表示

为了解决某个问题,首先必须用符号把该问题表达在计算机上。也就是说,必须指定向何处探索的所谓探索空间。通常,人们在状态空间概念的基础上对问题进行表达。在状态空间的概念下,问题可以用下列要素进行表达。以“猴子与香蕉”问题(图 5.1)为例。它的解决途径奠定了机器人行动规划的基础^[2]。

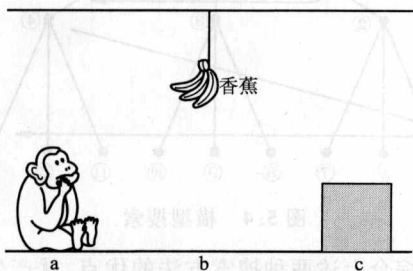


图 5.1 “猴子与香蕉”问题

1) 初始状态

描述需要解决的问题目前处于什么状态。猴子位于场所 a 处。香蕉悬挂在场所 b 的上方。箱子置于场所 c 处。猴子手中未持有任何东西。它们可以描述如下:

$at(monkey, a, bottom)$ $at(banana, b, top)$
 $at(box, c, bottom)$ $monkey(empty)$

2) 目标状态

描述需要解决的问题以何种状态为目标。具体到“猴子与香蕉”的问题,猴子手中持有香蕉的状态即是目标。

$monkey(banana)$

3) 作用要素

作用要素用来描述改变状态的手段。把某个作用要素(合理和可能的)作用于某个状

态时,会发生向其他状态的推移。作用要素的描述方法各有不同,在机器人的行动规划系统 STRIPS^[2]中,用以下三种要素充当作用要素:

① 该作用要素可施加的“前提条件”。

② 施加该作用要素后,描述增加新状态(变成新的真状态)的“增加表”。

③ 施加该作用要素后,描述删除状态(变成新的伪状态)的“删除表”。

在 STRIPS 方式中,“猴子与香蕉”问题的作用要素可以描述如下:

$goto(x, y)$:猴子从场所 x 移动至场所 y 。

① 前提条件: $at(monkey, x, bottom)$, x 在何处均可。

② 增加表: $at(monkey, y, bottom)$ 。

③ 删除表: $at(monkey, x, bottom)$ 。

$movebox(x, y)$:猴子把箱子从场所 x 移动至场所 y 。

① 前提条件: $at(monkey, x, bottom)$ and $at(box, x, bottom)$:猴子和箱子位于同一场所 x 。

② 增加表: $at(monkey, y, bottom)$, $at(box, y, bottom)$ 。

③ 删除表: $at(monkey, x, bottom)$, $at(box, x, bottom)$ 。

$goup$:猴子登上箱子上。

① 前提条件: $at(monkey, x, bottom)$ and $at(box, x, bottom)$, x 在何处均可。

② 增加表: $at(monkey, x, top)$ 。

③ 删除表: $at(monkey, x, bottom)$ 。

$grasp(x)$:猴子抓住 x 。

① 前提条件: $at(monkey, y, z)$ and $at(x, y, z)$ and $monkey(empty)$, y 在何处均可, z 在何处均可。

② 增加表: $monkey(x)$ 。

③ 删除表: $monkey(empty)$ 。

4) 约束条件

所谓约束条件,就是在解决问题的过程中必须遵循的条件。例如,在“猴子与香蕉”的问题中,“必须在 10min 内取到香蕉”就是约束条件。

根据上述“初始状态”、“目标状态”、“作用要素”集合、“约束条件”,就可以把问题表达清楚。把问题表达清楚,并在满足约束条件的前提下求解从初始状态变换到目标状态

的作用要素序列,即在状态空间内实施搜索,这就是所谓的问题解决。下面来讲述在状态空间内进行搜索的方法。

2. 问题树的探索

如前所述,问题解决可以归结为对状态空间的搜索问题。把状态空间用树状图进行描述,得到图 5.2。图 5.2 中的节点和分枝分别对应于状态和作用要素。最上方的节点是初始状态。施加适用于初始状态的作用要素而得到的结果状态被直接置于紧挨着初始状态的节点位置。这样就形成了一种连接的规则,就是施加适用于某个状态的作用要素而得到的结果将被安置在紧挨着该状态的下方节点位置上。所谓的问题解决就变成了沿状态树搜索目标状态应该位于哪一个节点上。有组织的网络搜索基本方法有纵型搜索方法和横型搜索方法两种。

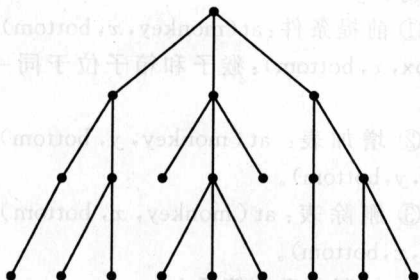


图 5.2 状态空间树

1) 纵型搜索

纵型搜索又称为深度优先搜索。如图 5.3 所示,若从某一分枝开始进行搜索,那么它一直往下搜索,如果发现走投无路(未找到目标状态),就稍稍折回上方节点后再继续往下搜索。这种走到尽头后有少许返回的现象被称为折回。如果碰巧选择了具有正确解的

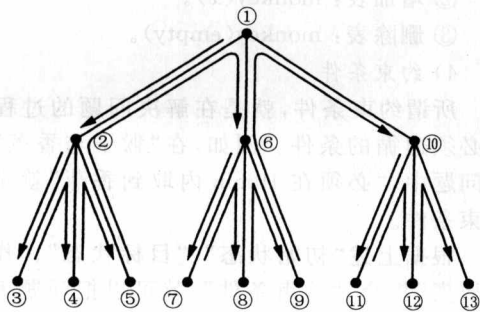


图 5.3 纵型搜索

分枝(目标状态在该分枝的节点上),那么纵型搜索方法就能快速地寻找到正确解;但是如果运气不好,即使正确解位于距初始状态较“浅”的节点上,要想达到那里,也需要花费非常多的时间;如果分枝呈无限扩展状,甚至无法达到正确解。

2) 横型搜索

模型搜索又称广度优先搜索。如图 5.4 所示,从某一个节点开始,先对同一级的所有节点进行搜索,然后再转而对该下级的所有节点进行延伸搜索。横型搜索的特点与纵型搜索形成对照。如果正确解(目标状态)位于距初始状态较“浅”的节点上,那么很快就能寻找到正确解;反之,如果它位于较“深”的节点上,那么就不得不搜遍该“深度”前的全部节点。它的另一个缺点是,在搜索的过程中,需要记忆的节点数目会非常多。

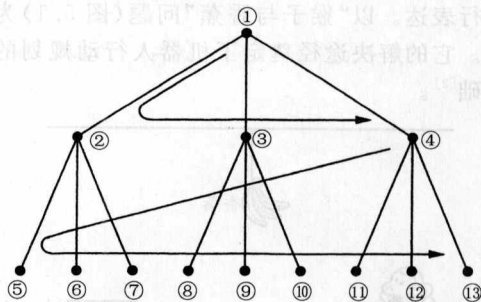


图 5.4 横型搜索

综合上述两种搜索方法的优点,就产生了反复纵型搜索方法。对于两种传统的方法来说,搜索的特点是无一遗漏(如果分枝不是无限延伸的话),所以肯定能找到正确解,但是一般来说耗费的代价太大。若事先将某一状态接近目标状态的程度指标(到达目标前的代价预测值)表达成启发式,那么就可以考虑根据这个指标,从希望值最高的节点出发开始进行搜索。这就是反复纵型搜索方法,它是一种基于启发式的搜索(又称试探搜索)。

3) 最佳优先搜索

基于启发式的搜索方法中,最简单的当数登山法。该方法义无反顾(不折回)地一路搜索和追寻指标值最优的节点。假如我们把目标设定在山顶上,该方法的攀登速度虽然比较缓慢,但它总是朝着高处一步一步地攀登,因此而得名。如果只有一座山峰,登山法

可以保证到达山顶,如果还有一些较低的山峰,那么就存在着登上较低山顶后即停止继续攀登的危险。因此,登山法不能拿来就用,需要对其进行改良,改良后的登山法叫做最佳优先搜索方法。

如果搜索问题中存在比目标状态低的山顶,那么登山法就无法从低山顶出发前行继续搜索的进程。它将囿于当前局部的利益。最佳优先搜索法(在登山法中增加折返行动的方法)更具全局观点,能克服这个缺点。该方法所采取的战略是从此前到达的所有节点中选择一个希望值最高的节点向它攀登。该方法的优点是即使因为某种偏差登上一个较低的山顶,它也会从这个山顶上下来,改变路线后再向较高的山顶进发。

4) A* 搜索

最佳优先搜索法虽然能够达到正确解(目标状态),但为此所付出的代价未必是最小的。在某种条件的基础上,保证到达目标状态的代价最小的搜索方法称为 A* 搜索^[3]。

3. 问题的分解

如果遭遇非同寻常的复杂问题,一般的措施是将其分解成比较简单的局部问题(原始问题),分别予以解决,再对解进行综合,以期得到原问题的解。

以“梵塔”的问题解决为例。这个难题如图 5.5 所示,要求将放置在 A 的 3 枚圆盘,移动到 C 的状态。条件是一次只能移动 1 枚圆盘,不能把大圆盘放置在小圆盘之上。该复杂问题可以分解成较为简单的问题,具体分析如下:

① 问题要求实现的目标状态是把所有圆盘都移动到 C 处。首先需要把圆盘 3 移动到 C 处。前提条件是 C 必须空置出来。

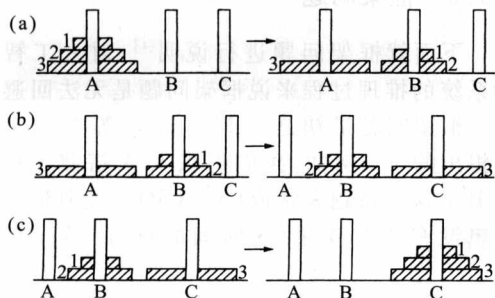


图 5.5 “梵塔”的部分难题

② 在初始状态,为了移动 A 上的圆盘 3,必须先把圆盘 1 和圆盘 2 挪走。但若把圆盘 1 和圆盘 2 放置到 C,那么将对圆盘 3 的移动造成妨碍,因此暂时把它们移动到 B 是恰当的。

③ 把圆盘 1 和圆盘 2 置于 B,圆盘 3 置于 C,然后再把圆盘 1 和圆盘 2 移动到 C。

上述的①、②、③均属于难题的一部分(图 5.5),不过任何一个问题均比原来的“梵塔”难题要简单,相对容易解决一些。尤其是图 5.5(b)更是一个简单得无法再简单的原始问题。同样,图 5.5 中的(a)和(c)都可以像图 5.6 那样分解成原始问题。

像图 5.6 一类形式的问题分解图称为 AND/OR 图。它与状态空间图在形式上有类似之处,但意义不同。在这个图中也有分枝,它们意味着问题的分割。分枝中带有弧的符号表示是 AND 节点,不带弧的符号表示 OR 节点。为了解决 AND 节点的问题,必须解决该分枝节点下所有分枝所代表的部分问题。为了解决 OR 节点的问题,则只需要解决该节点下任何一个分枝问题就可以了。所谓解决 AND/OR 图表示的问题,就是搜索包含在这个图中的与解对应的那部分图。至于搜索的方法,也有纵型搜索和横型搜索两种方法。

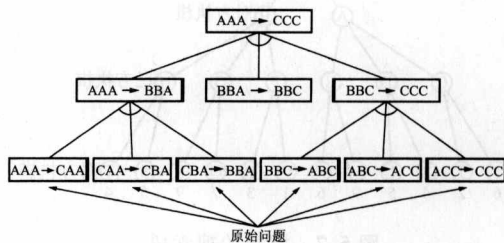


图 5.6 “梵塔”的 AND/OR 图表示

在解决某个问题的时候,究竟选状态空间表达还是问题分解表达,对问题解决的难易程度有很大的影响。例如,“梵塔”难题,选用问题分解表达解决起来就相对容易一些。众所周知,状态空间表达与问题分解表达之间原则上是可以进行变换的。

4. 博弈树的搜索

此前涉及的搜索方法,主要应用在一类由个人单独解决的问题上,就如上面的难题那样。还有一种情况是与对手有关的问题解决,接下来举象棋和围棋这类双人比赛的例

子,说明特有的搜索方法。比赛与难题的不同点在于对手(敌方),对方未必依照己方的设想行事。再者,难题的正确解具有明确、有限的目标状态;相反,比赛的胜局却有几乎无限多的目标状态。

一般来说,比赛用图 5.7 所示的博弈树表示。各个节点相当于棋局,节点中的文字为该棋局当前的棋步。博弈树最上方的根节点表示现在的棋局,正值己方执棋。该节点以下的节点是己方走出某一棋步后,轮到对方执棋的棋局。图 5.7 表示从当前棋局往后考虑 3 着的棋局。往后考虑的着数(深度)越多,其好处不言而喻,不过受到记忆和推理能力的限制,能够预见的着数是有限的(1997 年战胜人类国际象棋世界冠军的计算机,平均可以预见 14 着棋)。通常能在多大程度上预见棋步的着数,影响棋局结果的评价值。这个评价值就是对棋局形势判断量化的指标。己方的目标是走出评价值大的棋局,对方的目标则相反,极力让这个评价值最小(即于对方更为有利的棋局)。上述状况对基于博弈树的搜索方法而言,可以用基本极大极小法和 α - β 法加以说明。

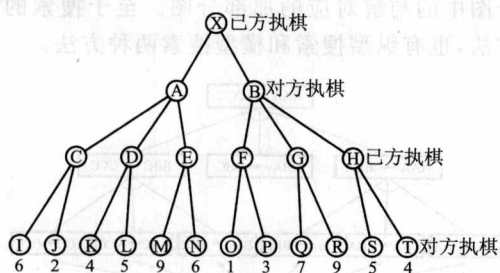


图 5.7 博弈的搜索树

1) 极大极小法

试考虑图 5.7 所示的原始棋局,如何判断己方究竟是走 A 棋步或 B 棋步更有利呢?在图 5.7 中,深度为 3 的层面上有 12 个节点,旁边用数字标注了它们各自对应棋局的评价值。其中对于己方最有利的节点是 M。如果己方走棋步 A,对方走棋步 E,那么己方再走棋步 M,就可以实现这一有利的棋局。不过,考虑到对方也能算出走棋步 E 不利,己方可以改走棋步 A,而对方必定要走棋步 D。于是,此时己方有 K、L 两着棋可以选择,可以从中选定评价值高的 L 节点方向。结果,当己

方走出棋步 A 的时候,就可以预测未来将出现棋局 L。因为 L 的评价值为 5,所以 A 的评价值也是 5。类似地,如果己方走棋步 B,可以预测未来的棋局为 P,结果 B 的评价值与 P 的评价值同为 3。所以,在这个棋局下,断定走棋步 A 是有利的。

将上述判断过程的原则综合一下就是,如果己方执棋,那么应该能在对方下一步执棋的棋局中得到最大值(maximal)(即己方希望尽量对自己有利),如果是对方执棋,那么应该能在己方下一步棋局中得到最小值(minimal)(即对方希望尽量对己方不利)。在图 5.7 的例子中,提前考虑的着数深度为 3(考虑更多的着数也可),这样探索下去,就能够寻找对己方最有利的棋步。这种搜索方法称为极大极小法。

2) α - β 法

该方法是在保证极大极小法相同结果的前提下,预见的着数更多、效率更高的方法。仍以图 5.7 的博弈树为例进行说明。设纵型搜索,并且其预见着数的深度为 3。

从图 5.7 左方开始查看 I、J、K、L,然后沿分枝上行发现 D 的评价值为 5。接着查看 M,再上行发现 E 的评价值为 9,显然它比 5 大,于是可以断定,对于对方来说,棋局 E 比 D 更不利。所以,对方不会选择走 E,于是也没有必要查看 N 的结果了,可以把分枝 N 剪掉(省略),称这样的剪枝为 β 剪枝。

继续搜索,查看 F 的情况。对方肯定是不不会选择对自己不利的棋步的,所以在评价值为 3 的节点处, B 节点充其量得到评价值 3。于是可知,己方这时最合理的选择是 A 而不是 B,至于 G 后面的(Q、R、S、T)各个节点已经不必再查看了,称这样的剪枝为 α 剪枝。

5.1.3 框架问题

下面就框架问题进行说明^[4],对人工智能系统的推理过程来说框架问题是无法回避的。框架问题最初是由 McCarthy 等于 1969 年提出的^[5]。例如,我们将积木 A 搭载于积木 B 上这一命题表达成(on A B)。经典形式逻辑没有状态变化(随时间的推移)这个概念。因此,(on A B)被当作公理乃至定理对待,它一旦成立就永久成立。所谓问题解决,就是求解让对象物从初始状态变化到目标状

态所需要的作用要素序列,如果状态不发生变化便失去了意义。因此,处理上述命题时首先考虑的一件事情是以显式的形式把状态概念引入自变量,并以(on A B S)的形式表达在状态 S 下将积木 A 置于积木 B 上这一事实。但是,这种方法的缺点在于各种状态和各个作用要素,不管它们是否发生变化,都无一例外地要求描述作用要素与状态之间的对应关系。假设状态数为 m ,作用要素为 n ,则必须对 $m \cdot n$ 个规则进行描述。由于计算量过大,从效率方面进行衡量,发现这种方法无论如何都是难以接受(系统变为低效的)的。

一般来说,关于作用要素引起变化的内容只占整个状态描述的一小部分内容。例如,在点着电灯的房屋中,即使把茶杯从茶碟上端起来,电灯通常仍然是亮着的。若根据上面介绍的描述方法,就必须无一遗漏地描述所有的规则,它们是“即使举起茶杯,电灯仍然亮着”、“即使把茶杯放回茶碟上,电灯仍然亮着”、“即使用茶杯喝咖啡,电灯仍然亮着”等。结果描述的量变得异常庞大。解决这个问题是框架问题的出发点。框架问题最初的定义就是如何解决形式逻辑中状态描述的量异常庞大的问题。

如果仅仅希望减少描述状态的量,可以考虑只描述建立命题当初的状态,此后,只要该命题未被明确地否定,就一直认为它成立(这种论断被称为框架公理)。借助于这个方法,确实能减少状态的描述量,但会引发新的问题,即为了找出与该命题最接近的描述,需要追溯到以前对状态曾经做出的推理。后果显然只是将描述的量转嫁到推理的量上,并没有从本质上解决问题。

所以,在制定框架问题的解决策略时,首先需要考虑形式逻辑将导致何种副作用。STRIPS^[2]就是一个例子。在前面已看到,我们对各种作用要素分别地定义了前提条件、增加表、删除表等。如果每当施加作用要素时能遵照定义实际改写一下公理或定理,那么就意味着既无需再描述 $m \cdot n$ 个规则,也无需再追究过去的推理。但是在 STRIPS 中,作用要素和作用对象被分离表达,如果框架问题对形式逻辑带来的副作用因对象而异,那么上面的办法就无能为力了。设想茶杯放置在茶碟上的状态,如果移动下面的茶碟,上面

的茶杯也随之移动,但单独移动茶杯,茶碟却是不会动的。也就是说,只根据“移动”这个作用要素无法表现这个差别。解决该个案并非难事,但如果无一遗漏地对施加于各个物体的作用要素一一进行描述,那么再次描述的量又会变得异常庞大。这里我们又一次感受到框架问题的重要性。

在有关框架问题的诸多讨论中,人们逐渐认识到解决形式逻辑描述量过于庞大的问题绝非是一件小事,相反,从庞大的信息中挑选适用的信息甚至是一件大事。这样人们就能站在更广泛的角度,从有别于传统框架问题定义的意义上解释框架问题,因此称之为一般化框架问题。

计算机(机器人)根本无法解决一般化框架问题。不过由此认为找到了人类智能与机械智能在本质上的区别之处就错了。因为,即使人类也无力解决一般化框架问题。作为例子,我们举一句日常用语“别给他人添麻烦”为例。这句日常用语是长辈对晚辈的一种典型的说教,但是要把这个台词具体地写出来却相当困难。因为麻烦的信息不像“伤害别人”、“对人撒谎”等那么具体,所以严格地说,遵从这条说教是不可能的。因为由自己的行为产生的影响潜在地被加以无限扩展,结果对所有方面都能不负责任。由物理学得知,某事某地某个人的喘息都会以光速对未来宇宙空间带来某种影响,或许这将在某地给某个人添麻烦。人类之所以被“别给他人添麻烦”这样的说教烦恼,就是苦于无法解决一般化框架问题。

但是,在大多数情况下,人类不会因为一般化框架问题无法解决而备受折磨。意思并不是说人类一旦遇到不得不解决的场合能够自然化解,而是几乎就遇不到非解决不行的情况。有效地借助于启发式方法,人类往往能够摆脱必须从庞大的信息中提取出适当信息的困境。机器人要想达到人类解决问题的水平,同样要避免陷入一般化框架问题的困境。

松原 仁

5.2 学 习

5.2.1 什么是学习

面对动态连续变化的实际环境,真实智能行动系统必须构筑起对环境有效的描述,

以便通过与环境的作用,以某些形式在系统内部生成有目的的行动,因此学习过程是不可缺少的。上述系统的一个典型例子就是机器人,它必须实时处理决策的问题。所谓学习,心理学的解释是“从一定场合中得到的经验,能在随后面临同样或类似情况时对个体行动的变化或行动可能性的改观带来影响,这就是学习。不过其中并不包括本能的反应倾向,或者暂时状态(由熟练、疲劳、动机等原因造成的)引起的行动改变”。本节将上面的“个体”一词用机器人来替换,讲述在机器人学习时可以借鉴的设计方法。

学习的形态或构造,以及机器人的构造、环境、任务方面的不同,再加上学习后系统内部参数的变化,都会导致学习方法的不同。我们姑且举一个目前应用的机器人学习形态(图5.8),来讨论机器人学习形态的分类,虽然这并不是十分严格的划分方法。

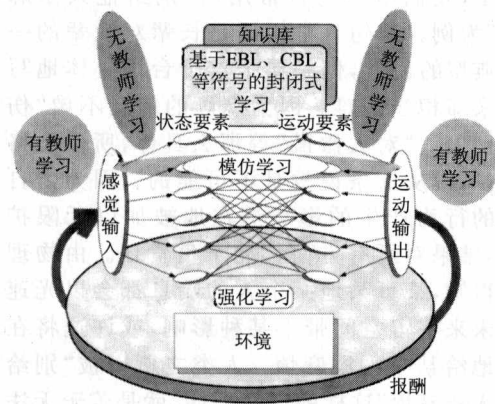


图 5.8 学习的构造

1. 基于符号操作的封闭式学习

基于符号操作的封闭式学习是基于事例的学习(case-based learning)、基于解释的学习(explanation-based learning)中的典型学习事例。它假定背景中存在有丰富的知识库。学习的前提是借助于符号描述机器人遭遇的状况和相应采取的行动,然后利用知识库进行分类、类推等操作,构建规则系统。输入、输出的符号用来解释这些数据库所赋予的意义。

即使假定机器人在现实世界中遭遇的状况和行动被离散化后,基于知识库的操作问题也能够得到解决,但是解决的结果本身往往使人产生人工智能领域与处理现实世界的

机器人学领域相背离的感觉。从这种观点出发,人们面临着如何分解机器人遭遇的状况,以及如何抽象出机器人多自由度动作的问题。学习法就是处理这些问题的重要方法。

2. 有教师的学习

有教师的学习的意思是指导者向学习者明确地展现正确的示例,同时指出后者的偏差,帮助他得到正确的解答。有教师的学习相当于教师将视觉或其他感觉数据模式分类化和抽象化,并给出正确的解。有一类有教师的学习能够由感觉信息等输入模式直接指导行动,然后针对未经历过的状况进行输出,例如,机器人就很期待这一类学习。不论是属于上述何种有教师的学习类型,误差反向传播法(back propagation)都是一种典型方法。有时人们输入正例或反例,制成决策树,以便在处理未经历经验输入时起到决策的作用。

3. 无教师的学习

这是一种根据统计学性质或某种约束条件对输入模式进行分类化、抽象化的学习。分类化、抽象化的主要手段是通过主要成分分析、沙漏型神经网络同构映射(把输入做成输出)等来减少输入的维数。无教师的学习又分为对感觉信息等输入模式进行分类,基于统计性质将输出运动模式拆分成动作要素的分类等。

作为这些方法的补充,本文在下面要特别举出由环境充当教师的强化学习方法和模仿学习方法,应该说,它们是机器人固有的学习方法,

4. 以环境充当教师的学习

其实有教师的学习,只能评判出最终结果,或者中途经历的优劣,因此关于是否真正存在有教师的学习的问题一直存在争论。近年来,机器人的行动学习法中有一种受到普遍关注的典型方法,即强化学习。经过改进后,强化学习已经成为一种能适应环境的机器人探索进化方法,如果我们认可环境也能充当教师,那么可以将它归于以环境充当教师的一类学习方法中。

5. 模仿学习

模仿学习就是在观察表演者的行动后,学习者将它们以某些形式变换成自身的运动命令,实现行动的学习方法。

在逻辑上,强化学习和模仿学习两个都可以划归有教师的学习一类,它们的重要特点是从输入到输出,都通过映像来学习,都涉及机器人学的一个基本问题。下面我们将重点说明这些方法,特别是强化学习和模仿学习。

5.2.2 有教师的学习

如图 5.8 所示,对于机器人来说,有教师的学习中分为两个阶段,即感觉信息输入的阶段和运动输出的阶段。前一个阶段与模式信息的分类有关,此时利用脸部图像识别人或物体。后一个阶段与输入的模式有关,通过明确地演示机器人所期望的行动输出,从输入模式来学习运动输出的映像。在算法方面,则有基于神经网络的误差反向传播法、基于信息量标准的决策树构建法等方法。当学习尚处于输入阶段(感觉信息抽象化)时,一般来说,只要未进入行动决定之前,都不依赖于学习者的运动能力;反之,则无法保证分类能够适应机器人本身的性质。与此相对应,如果学习处于运动输出阶段,由于它属于间接信息(教师演示),从而可以获得结构化的包含机器人身体能力在内的输入模式。关于这种学习方法,下面介绍一种所谓的行动决策树构建方法,它的特点是基于信息量基准,所以它的观测效率比较高。

如图 5.9 所示,在球场周围立有界标(球场的四角和中央两端竖起的 6 根双色圆柱,

并且有两个球门)的环境中,我们考虑机器人接近球且取得射门行动的情况。机器人的视野角度(横向 53° ,纵向 41°)是有限的,因此它在瞬间内能够获取的行动决定的信息(界标的构形)比较少,不过借助于摄像头的扫描能够扩大其视野,克服上述缺点。因此,在进行示教时,需要向机器人示教全方位的观测行动。机器人根据信息量标准,构成界标观测的预测树和意义决策树(行动或继续观测),并在实际运行中予以应用。虽然基于这两种树来观测和识别自己的位置时可能会产生一定的不确定度,但是,如果行动能被唯一地确定,就仍然能减少观测的次数。在这种场合下,基于界标观察方法,能唯一地确定机器人自身位置的识别,但并不直接意味着是几何学上的重构。

图 5.10 给出了实验结果。行动有前进(F)、左转弯(L)、右转弯(R)三种类型,界标

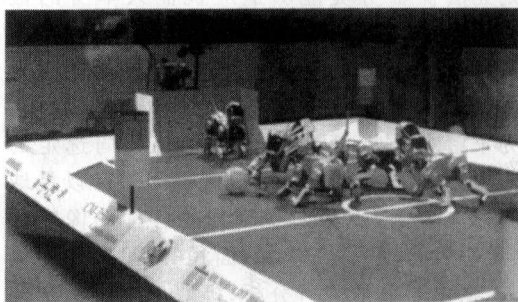


图 5.9 基于界标观测的行动决定(大阪大学)

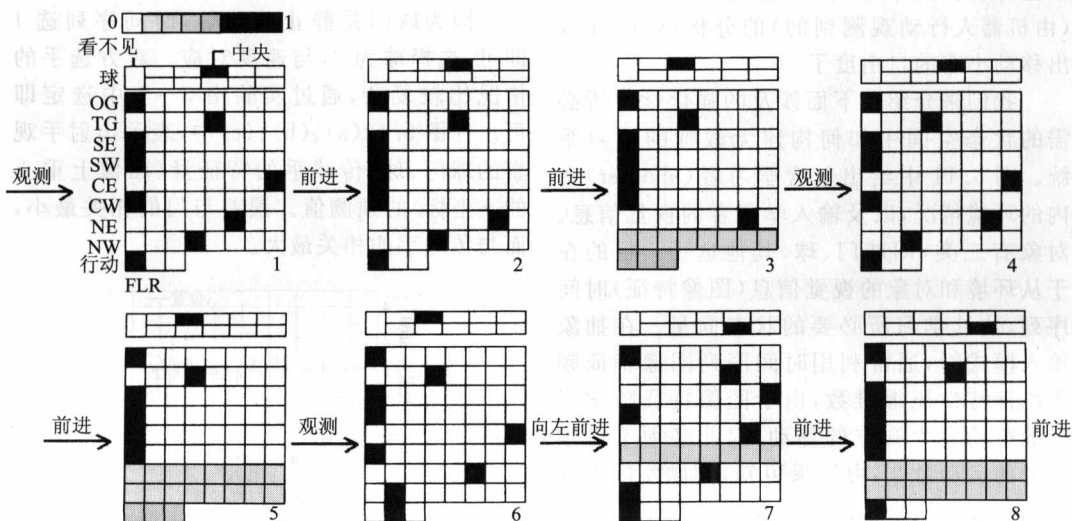


图 5.10 实验的概率分布

表示球的位置(如对方球门为 TG、西北球为 NW 等)。在图 5.10 中,表示出各个界标可观测方向(包括未观测到的情况)的概率分布,以及在这种情况下允许选择的各个行动的概率。在观测 3 中,NW 具有不确定度,所以选择行动成为观测(observation),而观测 4 中则选择了前进行动。在观测 7 和观测 8 中,虽然在界标观测方向上也存在不确定度,但是其他界标的观测概率可以唯一地决定行动。

5.2.3 无教师的学习

无教师的学习相当于图 5.8 中机器人的学习主要集中在感觉信息输入、运动输出这两个阶段,在进行主要分量分析和沙漏型神经网络处理时,通过减少输入模式的维数,实现抽象化。当学习尚处于输入阶段(感觉信息抽象化)时,一般来说,只要未进入行动决定,就都不依赖于学习者的运动能力;反之,则无法保证分类能够适应机器人本身的性质。在运动输出模式抽象化时,如果以较少自由度实现对较多自由度机器人的控制,只依赖于运动输出的情况会产生同样的问题。为了解决这些问题,通常的措施是向选定的输入模式施加偏压间接地进行回避。以足球机器人为例,机器人观测到的各种图像特征(重心,四角的 x 、 y 坐标,面积等)可以作为输入,从主要分量进行分析,提取出唯一确定环境内机器人位置的必要信息,如球和球门的位置、方向、大小等,再针对光流场主要成分(由机器人行动观测到的)的分析,就能提取出移动小车的自由度了。

我们来介绍在下面涉及的强化学习所必需的状态空间中如何构建无教师的学习系统。图 5.11 中给出包含学习者(shooter)在内的环境情况,以及输入学习者的视觉信息。对象有三类,即球门、球、其他选手。目的在于从环境和对象的视觉信息(图像特征)时间序列,估计学习所必要的状态向量。在抽象输入模式时,通常利用时间序列图像特征频率统计特性压缩维数,由于图像特征随学习者的行动发生视点的移动,因此必须考虑学习者的运动命令,由结果可知,问题实际上变成从含有学习命令的时间序列数据中估计出那些能估计的对象在画面上运动的状态向量。

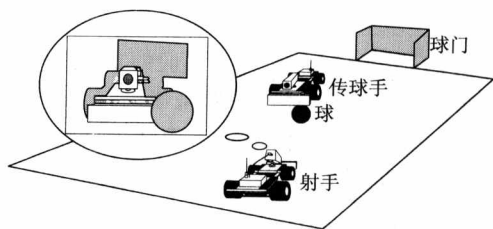


图 5.11 2 台机器人和环境

状态向量在描述多输入(行动)多输出、(观测)的关系时是十分必要的。状态表示方法(表现状态向量的模型)用到所谓的标准变量分析(CVA: Canonical Variate Analysis)的知识,它属于系统识别的一种方法。在离散时间中 CVA 采用如下线性定常状态空间模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (5.1)$$

式中, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ 和 $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^q$, 分别表示机器人的行动向量和观测向量; $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量。另外, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{q \times n}$, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{q \times m}$ 为参数矩阵。学习者必须根据观测和行动序列 $\{\mathbf{y}, \mathbf{u}\}$, 估计状态向量的维数。具体地讲, 状态向量 \mathbf{x} 用过去的观测与行动序列的线性之和表示。为了对状态向量的时空大小采取折中表达(越大则预测误差越小, 但越小则对后面的学习越有利), 时间序列的长度和状态向量的大小(从 CVA 可以求出主要分量序列, 故选取此顺序)最初都应该选择从 1 开始, 然后逐渐增大至预测误差满足预设的门限值为止, 这样就能估计出适当的状态向量。

因为球门是静止的物体, 时间序列选 1 即可, 选择球为 2, 与速度对应。对方选手的情况比较复杂, 通过实验由 3~5 中选定即可。在图 5.12(a)、(b)、(c)中, 表示出射手观察的球门、球、传球手的特征量(图像上重心的 y 坐标)的预测值。误差与门的相关最小, 而与传球手的相关最大。

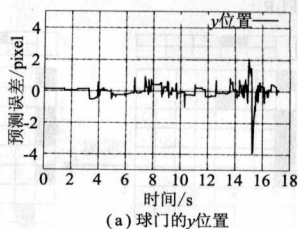


图 5.12 基于实际环境局部预测模型的预测误差

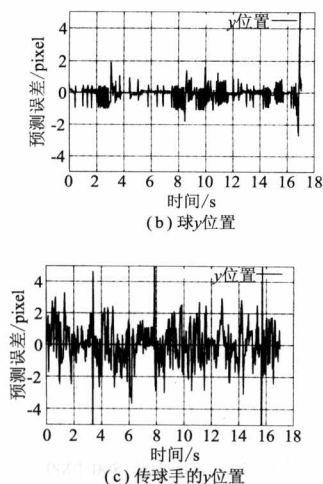


图 5.12 基于实际环境局部预测模型的预测误差(续)

5.2.4 以环境为教师的学习

作为能获得反射性且适应性行动的机器人的学习方法,有一种没有明确教师,而将环境作为非明示教师的强化学习受到人们的关注。这种学习法的最大特征在于几乎不需要具备有关环境和机器人自身的先验知识。在强化学习的基本框架下,在离散时间序列过程中,机器人和环境分别作为同步有限状态自动机被建模。机器人感知身处环境的状态,并完成一次行动。根据状态和行动,环境向新的状态转移,为此机器人得到相应的报酬。通过这些相互作用,机器人以完成给定任务为目的展开学习(图 5.13)。下面介绍基本框架、研究课题和例子。

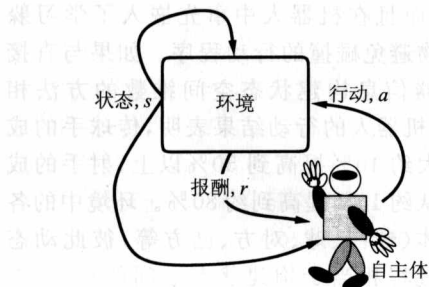


图 5.13 机器人环境的基本模型

1. 强化学习的基础

设机器人能识别表示环境状态的集合 S , 能针对环境取出行动集合 A 中的一种行动。在这种条件下, 环境被模型化为马尔可

夫过程, 根据当前状态和机器人所采取的行动按照概率实现状态转移。设当前状态为 s , 机器人采取的行动为 a , 下一个状态为 s' , $T(s, a, s')$ 表示此时的状态转移概率。接着, 针对各个状态-行动对 (s, a) 定义报酬 $r(s, a)$ (图 5.13)。

强化学习的问题一般是指在无限时间下, 寻找使报酬的衰减总和最大化的策略问题。策略 f 是状态集合 S 向行动集合 A 的映射。其总和称为“累计报酬”(return), 定义为

$$\sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n r_{t+n} \quad (5.2)$$

式中, r_t 为各个状态在采取策略 f 的时刻 t 的报酬; γ 为衰减系数, 它控制报酬在未来对行动价值的影响程度, 它的取值通常小于 1。

给出转移概率和报酬的分布, 就能够在动态规划法的框架内求解最优策略。

2. Q-学习

在实际机器人环境中, 完全已知转移概率和报酬分布的情况很罕见, 这时可以一边进行试探, 一边学习最优行动。下面介绍的所谓“Q-学习法”就是这样一种探索学习法。

在状态 s 采取行动 a , 设在选取最优策略时的累计报酬期待值, 或者“最优行动价值函数”为 $Q^*(s, a)$, 它可以用回归方式定义为

$$Q^*(s, a) = r(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') \max_{a' \in A} Q^*(s', a') \quad (5.3)$$

因为转移概率 T 和报酬 r 最初是未知的, 所以需要采用在线方式逐次更新“行动价值” Q 。初始值可以取任意值(通常为 0), 每采取一次行动, Q 的值按下式更新一次:

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha) Q(s, a) + \alpha [r(s, a) + \gamma \max_{a' \in A} Q(s', a')] \quad (5.4)$$

式中, r 为在状态 s 采取行动 a 时的报酬; s' 为下一次的状况; α 为学习率, 在 0~1 之间取值。

3. 强化学习的基本课题

强化学习应用于实际机器人任务方面时所面临的重要课题可以归纳为以下三个方面:

① 实际环境中工作的传感器和执行器的输出未必直接与状态和行动一一对应。这时与其抽象传感器空间和模型空间以适应目的, 还不如构成状态和行动空间。

② 在多数场合,只有当机器人得分时才能得到报酬,为此势必需磁于要多次试探而延长学习的时间,这样会造成机器人应用方面的困难,因此能否采取加速学习的措施就至关重要了。

③ 简单问题并无强化学习的必要,只有当状态空间的维数增加,问题的复杂性凸现后才有强化学习的必要性。

1) 状态、行动空间的构成

将传感器空间与电机空间分段处理是人工智能或机器人学中经常面临的基本课题,强化学习也是如此。在强化学习中,若以报酬作为基础,那么人们总是希望将环境和机器人自身的特征进行分段处理。通过将融合引入强化学习过程,展示出传感器逐步分段的方法,以防止徒劳无益的再分割。

下面我们来考虑一个带视觉的移动机器人把球射入球门的具体任务。由图像得到的信息为五维参数,包括球的位置(x, y 坐标)和大小及球门的位置、大小和方向,行动则是下达给独立驱动的左右轮的两条转动命令。五维感知空间由最初的两个状态(目标状态及其他状态)构成。将有关行动的状态变化用函数近似表示,只有当近似的状态变化与预测不同,或者无法到达球门的情况下,才对状态进行分割或融合,以估计出函数新的近似范围。这样做能减少无用探索。然后只针对新分割状态的行动价值初始化,引入通常的强化学习(因为状态数少,故学习时间短)。在行动选择中加进随机性,以适应环境的变化。

图 5.14 给出了实验结果。图 5.14(b) 的实线、虚线分别表示状态数和过去 20 次试验的成功次数。实验结果显示,在第 450 次试验中,将球的大小变成原来的两倍后成功率立即下降,但曲线随后又恢复了原状。图 5.14(a) 是把分割成五维的状态空间投影到二维(球和球门的大小)平面上得到的图像,右上方表示球门的状态。输入状态所描述的情况是显而易见的。在状态发生变化前,电机的命令始终如一,将该序列定义为行动,对行动时间做分割。顺便说一下,实际机器人需要花费 1 个半小时左右才能完成目的行动。

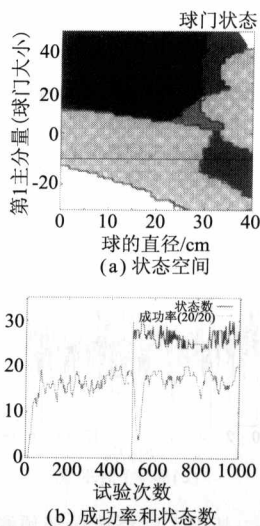


图 5.14 任务和实验结果

2) 学习加速和复杂任务的应对

将强化学习方法向多智能体环境扩展时会遇到一些问题,因为假如不知道同伴行动的策略,那么在动态环境中构造适当的状态空间就相当困难。如果同伴不学习,始终按照固定的策略行动,虽然利用 5.2.3 节中给出的状态向量估计法能够开展强化学习,但是相互学习却是十分复杂的任务,因为在进行自身学习时,同伴的行动在不断的发生(学习)。

图 5.15 给出学习过程中交互学习的一个进程,这个例子说明同时学习的困难是可以克服的。图 5.16 表示该进程在传球手与射手协调行动学习中的应用场景。最初,让传球手(图 5.16 中右方)学习向某一个方向踢球,然后让射手学习将滚动的球进行射门的动作,而且在机器人中事先嵌入了学习躲避障碍物避免碰撞的行动程序。如果与直接将传感器信息构建状态空间维数的方法相比,实际机器人的行动结果表明,传球手的成功率从大约 10% 提高到 50% 以上,射手的成功率也从约 10% 提高到约 80%。环境中的各个智能体(球门、球、对方、己方等)彼此动态识别的过程相当于构建状态空间的过程,而强化学习则可以视为智能体相互作用的学习过程。实验结果表明,由于经验(任务不同存在着经验上的偏差)的差异,即使是物理上的同一个物体(例如,滚动的球),所估计的状态参数也会不同,我们可以认为这是机器人个

性导致的颇为有趣的现象。随之而来的一个研究课题就是在实现协调行动的时候如何采纳和记取差异。

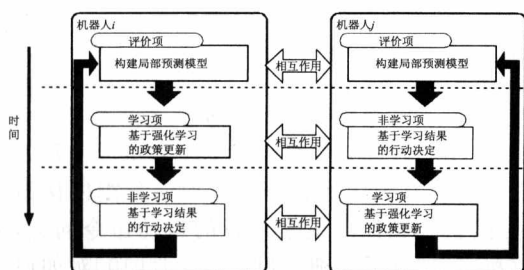


图 5.15 学习进程的一个例子

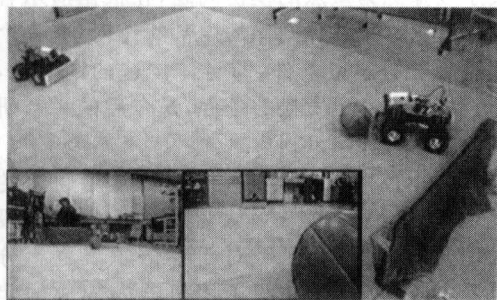


图 5.16 传球手和射手的协调行动(大阪大学)

5.2.5 模仿学习

模仿学习又被称为“见习”、“演示教学”等,它不仅是机器人特有的学习方法,也是人类获得各种行动方式的重要学习方法,与脑科学、认知科学之间存在着密切关系。模仿学习分为不同阶段,从婴儿模仿(由反射活动领悟)到理解演示行动的意图,再到改变实现做法,直到完成满足学习者最终目的的模仿。越是进入模仿学习的后期阶段,越需要有关学习者自身、环境(演示者)、任务的各种知识。模仿的基本构造是从“观察”开始到“运动生成”的映像,而映像的内容是从反射信息开始,直至驱使高级知识库的符号操作。关于映像基本上呈现出两大发展潮流。

在图 5.17 中表示了初期模仿学习的结构。演示者向自己的身体发送出运动命令 $\theta_D(t)$ 后动作被展现出来,学习者通过观察将其转化为图像特征序列 $x_D(t)$ 。然后,经过某些变换,发出学习者的运动命令 $\theta_L(t)$,完成动作的模仿。一种发展潮流是以某种形式将观察到的图像进行几何学三维重构,将其变换成世界坐标系的模仿运动序列 $X_L(t)$ 。随后,

求解逆运动学,得到学习者的运动命令 $\theta_L(t)$ 。上述潮流是迄今为止机器人模仿学习的主流方法,它所面临的课题是如何根据三维重构后的演示者运动序列来确定学习者应该模仿的运动序列。如果两者的身体构造相同,参数也已知,那么根据三维重构后的演示者运动序列直接引用逆运动学,即可求出学习者的运动命令 $\theta_L(t)$,如若不然,则必须针对学习者的身体构造做适当变换。从轨道计算中间点,再根据种种限制,生成适合学习者身体结构的运动轨迹。这时,需要考虑的并非是空间轨道的力学性质,而是学习者的动力学参数。如果仅仅是模仿手臂的伸展运动,即使模仿失败充其量不过是未完成任务而已,但是如果换成是模仿步行,若模仿失败就可能发生跌倒。将这种应用场合进行变化,应该注意到如何让目标轨迹适应学习者的动力学性质,动态滤波器等就是这方面的例子。

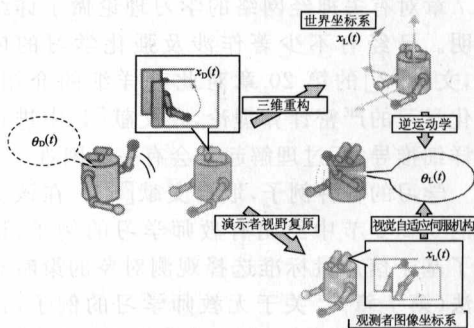


图 5.17 初期模仿学习的结构

另一种发展潮流,是从图像直接生成目标轨道,实现模仿行动。在最初阶段,演示者对自身进行观察,得到图像,并加以复原,然后将这些图像视为学习者应该模仿的目标轨道 $x_L(t)$,通过视觉自适应伺服实现模仿。后一种发展潮流的区别在于无须绝对坐标系中的三维运动序列描述,只要直接发出行动命令即可。换言之,前者以基于视觉的重构为前提来配合运动命令的生成,后者则试图从感知直接进行变换,因而无需逆运动学参数和环境信息。

对于拟人机器人这样的超多自由度机器人的行动控制来说,模仿学习是不可缺少的。其间行为的分段或重构是基本的问题,此时不仅涉及运动学的重构,势必还涉及动力学的重构。此外,基于非线性动力学行为的描

述和综合也受到关注。总之,模仿学习有多种层次和各种方法,机器人的学习,特别是拟人机器人的行动学习,今后会变得越来越重要。

〔关于文献〕 在1990年出版的《机器人技术手册》^[1]中,第4篇的4.4节针对有关机器人行动学习的内容做了讲述,其被列入人工智能的一个领域。随着人工智能领域向多智能体发展,以及强化学习在机器人研究中的强劲势头,目前将机器人学习与多智能体结合的研究十分流行。在文献[2]中,将第6篇中的第18~21章取出,在第18章中专门讲解多智能体的学习规范,对传统的归纳学习、决策树、信息量标准等也做了说明。在第21章中,对基于“说明”和“关联性”的学习进行了介绍。在第19章中,讲述神经网络的基础,对误差逆传输学习做了说明。利用文献[3]的第三部分“脑模型”,在第5章、第6章、第7章对有关神经网络的学习理论做了详细说明。已经有不少著作涉及强化学习的内容,文献[2]的第20章对此有详细的介绍。强化学习的严密计算理论,在文献[4]中进行了详细推导,不过理解起来会有一点困难。

学习的各种例子,取自文献[5]。在该文献的5.2.2节中给出有教师学习的例子,讲解了基于信息量标准选择观测对象的策略和方法(第7章)。关于无教师学习的例子,讨论了实现协调行动的状态空间构成问题(第9章)。有关强化学习的例子已经有不少报道,因此仅以单个机器人射门行动处理为例,对基本的强化学习构造做了简要的解释(第2章)。另外,还涉及状态空间在线分段处理(第4章)、标定问题(第9章)。在讲解加速学习的基本方法时,采取由简单任务逐渐提高难度过渡到复杂任务的内容安排,而且每一步都给出了实例。在GK对手的PK射门行动学习中,文献提供的方法是先假设对手的GK的能力较低,如何逐步提升对手的能力,以达到加速学习和提高性能的效果(第9章)。文献还介绍了另一种方法,即通过同一学习模块层的自组织化也能达到加速的效果(第7章)。文献还提供了一专门针对学习初期,或者因环境变动学习处于停滞时期的(第5章)一种通过示教加速学习过程的方法。至于依据流动图形主分量分析的运动构造问

题,可以参见文献[6]。

如何将教师的学习、无教师的学习、强化学习与人脑的部位和功能对应起来的假设已经分别被提出,并且正在被证实之中。有的文献(文献[7])提出了很有兴趣的见解,认为小脑对应于有教师的学习,大脑皮质对应于无教师的学习,大脑基底核对应于强化学习。文献[8]引用许多文献对模仿学习和拟人机器人之间的关系做了解释。至于如何分割模仿轨迹中间点,如何生成学习者的运动命令问题,文献[9]进行了详细的讨论。文献[10]对如何实现基于非线性动力学的模仿问题做了说明。关于以知觉为重点的模仿问题,在根据演示者的视野复原来估计同伴的内部状态时,有一个很有意思的假定条件,即身体构造的同一性,能否找到比它更宽松的条件,是今后的一个研究课题(文献[11,12])。

本小节把重点放在模仿学习演示轨道的实现上,不过文献[13]认为观察行为的分段处理、符号动作变换等对于模仿学习也十分重要,该文献详细介绍了用机器人构成的实验系统。文献[14]涉及如何从分析操作对象物体的接触关系为主入手观测,进而达到学习的目的。

在以环境为教师的学习中,除了强化学习以外,还有进化的方法,因篇幅所限,本小节并未涉及进化的方法。实际上,在不少著作中多有涉及,所以在这里不再引用。进化的方法在机器人中的应用论文集可以参见文献[15]。

浅田 稔

5.3 软计算

软计算(soft computing)是由模糊集合论的创始人扎德(L. A. Zadeh)提出的一种信息处理新概念。软计算的目的是在信息不确定或模糊的环境条件下,依据软信息处理的方法解决大规模问题或复杂问题^[1~3]。人类解决和处理纷繁的日常问题离不开认识、识别、理解、学习、规划、判断、表现、动作等有关的软信息处理机制,软计算就是在此基础上确立起来的新的方法论。它的特征大体上分为全局性、通融性、主观性三种。构成软计算的主要方法论有模糊理论(fuzzy theory)、神经元计算(neuro-computing)、概率推理,后来又

加入进化计算(evolutionary computation)、置信网络、机械学习、混沌理论等。在应用时,上述方法并不是单独的或排他的,而是相互补充的关系。

机器人要求具有多种能力,例如,环境认识、环境识别、决策、行动规划、行动学习、通信等。首先,机器人需要具有对某些知识的表现手段,以便认识环境。如果需要表现的信息中含有语言结构或某种模糊程度,模糊系统(fuzzy system)往往适合这种场合。在描述高度非线性的输入输出关系时,神经网络(neural network)比较合适。为了适当地表达输入输出关系,需要用到学习和最优化的概念。学习和最优化常借助于 δ 规划和进化计算。模糊系统和基于神经网络的反射行动常常被用于机器人的决策,如果把强化学习(reinforcement learning)用于逐次决策过程中,那么一种可能的选择是使报酬最大化。由上述分析可知,为了使机器人达到较高的智能,软计算方法是必要的。下面我们来介绍与机器人工程学应用关系比较密切的模糊理论、神经计算、进化计算、强化学习等方法论。

5.3.1 模糊系统

模糊理论是模糊集合论、模糊逻辑、模糊测度论等的总称。当表现一个复杂系统的时候,我们都熟知所谓的非兼容性原理(principle of incompatibility),它的意思是说,模型的正确度和精确度是不可兼得的。扎德提出了模糊集合论,它是描述和处理“模糊度(fuzziness)”的基本方法和理论。模糊度与人类语言和思维有特殊的关联。例如,人们常说的“快”、“年轻”,这些词汇实际上都具有多重含义,带有极大的主观性和随意性,很难给出一个明确的标准。在处理自然语言,进而是人类思考这类模糊问题的时候,人们认识到概率论不大适合,基础理论应该是模糊运算算法(集合论的扩展)、模糊测度论(概率论的扩展)、模糊逻辑和模糊推理(多值逻辑的扩展)。基于语言变量的模糊理论,是从“基于测量(measurement-based)”的方法,到“基于理解(perception-based)”的方法的规范改变的第一阶段,一般来说,可以理解为从数值计算(computing with numbers)过渡到词汇的计算(computing with words)。模糊理论一度在

控制领域得到广泛的推广和应用,现在它已经被拓展到其他领域。

1. 模糊集合

对于传统的集合来说,按照是否包含在集合内的隶属关系,它历来只有两个取值(1, 0),与此不同,模糊集合(fuzzy set)将这种隶属关系扩展到0~1之间的任意取值,并且利用隶属函数(membership function)定义模糊的概念。对应于模糊集合,传统的集合被称为明晰集合(crisp set)。利用隶属函数可以将集合A定义如下:

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1] \quad (5.5)$$

式中,对于 $x \in X$, $\mu_A(x)$ 的值在闭区间 $[0, 1]$ 内。例如,在图5.18中,速度可以用隶属函数模糊地表示“缓慢”集合的边界。按照传统的二值逻辑,命题的真值可以假定为是真(1),或者是伪(0)中的一个。语言的真值被定义为数值真值的闭区间 $[0, 1]$ 内的模糊集合形式,它构成了模糊推理的基本结构。

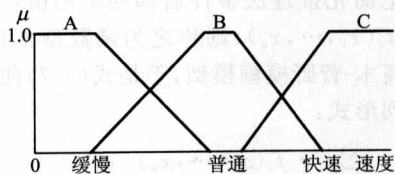


图 5.18 隶属函数的例子

2. 模糊控制

模糊推理以 IF-THEN 形式所描述的推理规则进行运算,它大致可以分为直接法、间接法两种方法。间接法以真值空间为媒介间接地求解推理的结果。下面我们针对直接法加以说明。设输入变量为 x_1, \dots, x_n , 输出变量为 y , 模糊集合为 $A_{i,j}, B_i$, 模糊推理规则可以表示为

IF x_1 is $A_{i,1}$ and x_2 is $A_{i,2}$ and
 \dots and x_n is $A_{i,n}$ THEN y is B_i

这里,从 IF 后开始至 THEN 以前的部分称为事件前部, THEN 以后的部分称为事件后部,虽然它在形式上与通常的 IF-THEN 规则没有区别,但是因为它引入了模糊集合,因此其推理方法也就不同。模糊推理一般可以分为以下3步:①针对给定的输入,求各个规则的拟合优度;②根据在①中求出的拟合优度,求各个规则的推理结果;③根据各个规则

的推理结果,求出最终的推理结果。上述各步骤可以应用不同的运算方法,不过运算方法不同,推理的代价和结果也将不同。典型的运算方法有 min-max-重心法、代数积-加法-重心法、简化推理法、函数型推理法等。下面对模糊控制中广泛采用的简化推理法和函数型推理法做一些介绍。

事件后部经常采用确定值(单调值)进行模糊推理,因为如果在事件后部应用模糊集合,计算的代价往往会很高。在应用简化推理法的时候,如果规则 i 的输入 x_j 采用的隶属函数为 $A_{i,j}$,设其拟合优度为 $\mu_{A_{i,j}}(x_j)$,输入数为 n ,则事件前部的各个规则的发生度变为

$$\mu_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{i,j}}(x_j) \quad (5.6)$$

假设事件后部的单调值为 w_i ,规则数为 r ,输出量可以用下式进行计算:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad (5.7)$$

如果把简化推理法事件后部的单调值扩展作函数 $f_i(x_1, \dots, x_n)$,则称之为函数型推理法,或者高木-菅野模糊模型,于是式(5.7)便扩展成下列形式:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i \cdot f_i(x_1, \dots, x_n)}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad (5.8)$$

近来关于稳定性方面的讨论相当活跃,相当盛行的是研究如何巧妙地将人类掌握的控制知识规则化,以便让模糊控制(fuzzy control)能达到人类一般高级的控制性能。后来,高木-菅野模糊模型向结构识别和参数识别的相关研究拓展,拓展后被称为 Kang-菅野模糊建模方法。此外,基于李亚普诺夫稳定理论也可以推导出模糊控制系统的稳定条件,它是通过线性矩阵不等式描述的。在基于模型的模糊控制中,人们还依据模糊模型描述非线性系统,运用并行分散补偿方法构成控制系统,以达到自然、有效的非线性控制的目标。模糊控制的特征是采用隶属函数将输入空间进行分割,模糊分割后形成局部并列分散控制和清晰的 IF-THEN 规则逻辑构造,为语言控制创造条件。

3. 模糊建模

在处理现实问题时,通常需要面对不完

全、不确定的信息,或者信息中隐含认识模糊度的因素,再夹杂人类本身的感情因素,甚至连评价标准都大相径庭。模糊建模就是根据由某个未知对象得到的输入输出数据,把它们或人类具有的知识提取出来,将其描述成显式规则的形式,它是决定模糊推理系统各种参数的过程。实际模糊建模的实施步骤为:①输入变量的选择和结构描述的确立;②输入输出空间的模糊分割;③隶属函数的形状和构形;④模糊推理方法的决定。

首先,为了根据众多输入信息描述输入输出关系,需要选择输入变量。此时有两种方法:一种是基于多变量分析做前处理,寻找输入输出数据中潜存的构造形式;另一种是基于输入变量选择与模糊推理构造表达之间的密切关系,采用多个子模型建立分层模糊模型。

其次,介绍模糊分割输入输出空间的方法,这时用到树构造和群集构造的概念。一般来说,隶属函数的形状以三角形和梯形模糊数居多,不过为了模糊控制应用上的便利,隶属函数常改写成高斯型模糊数的连续函数。对于变量 x ,若设集合 A 的隶属函数的中心为 a ,宽度参数为 b ,则三角形模糊数可以表示为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-a|}{b}, & |x-a| \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.9)$$

高斯型模糊数可用下式表示:

$$\mu_A(x) = \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right] \quad (5.10)$$

在上面的公式中,隶属函数是左右对称的,但有时也借助于隶属函数的构形实现非对称设计。可见,隶属函数对于怎样包含全部输入空间发挥着重要的作用。虽然增加隶属函数的数目能把问题表达得更加详细,但是规则数却会随之呈现指数上升的趋势。因此,模糊建模时需要在近似精度和规则数中做一个折中,最后决定适宜于表达的模糊推理方法。在给出教师数据的条件下,模糊规则参数满足 δ 规则,至于隶属函数的形状和构形以及分层规则的构造,可以采用进化计算。

5.3.2 神经元计算

一般认为,模糊系统(以下简称为“FS”)偏重于脑心理学的模仿,而神经网络(神经回

路网,以下简称为“NN”)则偏重于脑生理学的模仿。模糊推理的最小单位属于逻辑型结构,其中融合了清晰的语言规则,反观 NN,它的最小单位属于网络结构,由许多仅具有简单映像能力的神经元(neuron)模仿元素结合而成。神经元一般都是多输入单输出的,在生物系统神经元动作机理的基础上,麦克洛其(W. S. McCulloch)和皮特斯(W. Pitts)提出了神经元模型,根据这种模型,若神经元 j 的输出为 x_j ,从神经元 j 到神经元 i 的结合强度为 $w_{j,i}$,阈值为 θ_i ,将阈值视为发生的基准,则输入的总和为

$$z_i = \sum_{j=1}^n w_{j,i} \cdot x_j - \theta_i \quad (5.11)$$

神经元 i 的输出变为

$$y_i = f(z_i) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{j,i} \cdot x_j - \theta_i\right) \quad (5.12)$$

设发生函数为 f ,它用下列阶跃函数和 S 形函数表示:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{当 } x > 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } x \text{ 为其他值时} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.14)$$

这种网络被看作是一种由具有信号流动方向的节点构成的自适应网络。网络中不属于输入层和输出层的分层被称为隐层,网络构造大致可以分为分层构造型(图 5.19)和相互结合型(图 5.20)两类。处理静态非线性映像问题一般采用前者,而处理时间非线性的映像一般采用后者,它也被称为递推式 NN。

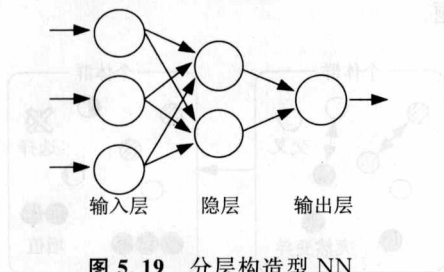


图 5.19 分层构造型 NN

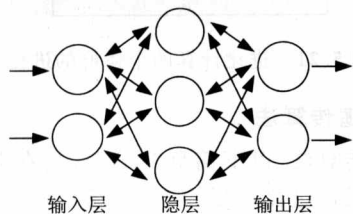


图 5.20 相互结合型 NN

1. 分层构造型神经网络

感知器属于一种分层构造型 NN,它可以充当基于线性分离的模式识别器。它由传感器单元(S)、回忆单元(A)、反应单元(R)构成。在最初构想的感知器结构中,S单元和A单元之间的结合是随机决定的,A单元和R单元之间的结合强度,通过最小二乘法的 δ 规则进行学习。至于多层感知器,则由多个感知器通过多层结合组成神经网络结构。下面针对 $l(l \geq 2)$ 分层的多层感知器的顺序计算和学习问题做一些说明。

若将输出层的神经元输出用 y_i^l , $l-2$ 层的输入用 x_k^{l-2} 表示,则可以用递推公式将输出表示如下:

$$\begin{aligned} y_i^l &= f\left(\sum_{j=1}^n w_{j,i}^l \cdot x_j^{l-1} - \theta_i^l\right) \\ &= f\left[\sum_{j=1}^n w_{j,i}^l \cdot f\left(\sum_{k=1}^n w_{k,j}^{l-1} \cdot x_k^{l-2} - \theta_j^{l-1}\right) - \theta_i^l\right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

式(5.15)中,为方便起见,设各分层的神经元数为 n 。最有名的学习算法就是反传学习算法(BP:Back Propagation)。我们将目标输出量 Y_i 与 y_i 之间的平方误差定义为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2 \quad (5.16)$$

如果输出层为 l ,由链规则可以表示成

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_p}{\partial w_{j,i}^l} &= \frac{\partial E_p}{\partial y_i^l} \frac{\partial y_i^l}{\partial z_i^l} \frac{\partial z_i^l}{\partial w_{j,i}^l} \\ &= -(Y_i - y_i^l) f'(z_i^l) x_j^{l-1} \end{aligned} \quad (5.17)$$

若设误差信号为

$$\begin{aligned} \delta_i^l &= -\frac{\partial E_p}{\partial z_i^l} = -\frac{\partial E_p}{\partial y_i^l} \frac{\partial y_i^l}{\partial z_i^l} \\ &= (Y_i - y_i^l) f'(z_i^l) \end{aligned} \quad (5.18)$$

通过反复应用减小误差的 δ 规则实施结合强度学习后,可以得到如下更新量:

$$\Delta w_{j,i}^l = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial w_{j,i}^l} = \eta \delta_i^l x_j^{l-1} \quad (5.19)$$

式中, η 为学习系数。如果层 $l-1$ 是隐层,它同样可以依据链规则进行如下导出:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_p}{\partial w_{k,j}^{l-1}} &= \frac{\partial E_p}{\partial z_i^l} \frac{\partial z_i^l}{\partial x_j^{l-1}} \frac{\partial x_j^{l-1}}{\partial z_j^{l-1}} \frac{\partial z_j^{l-1}}{\partial w_{k,j}^{l-1}} \\ &= -\sum_{i=1}^n \delta_i^l w_{j,i}^l f'(z_j^{l-1}) x_k^{l-2} \end{aligned} \quad (5.20)$$

如果把层 $l-1$ 的误差信号设置成下列形式,就可以完成。

$$\delta_j^{l-1} = \frac{\partial E_p}{\partial z_j^{l-1}} = \sum_{i=1}^n \delta_i^l w_{j,i}^l f'(z_j^{l-1}) \quad (5.21)$$

$$\Delta w_{k,j}^{l-1} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial w_{k,j}^{l-1}} = \eta \delta_j^{l-1} x_k^{l-2} \quad (5.22)$$

上面的公式中包含了层 l 的误差信号,而且它在得到输出层的误差信号后进行反传,所以称之为误差反向传输法。

为了提高 BP 法的学习速度,不但需要追加下列瞬时项,而且还应该对其实施规格化。若设瞬时系数为 α ,第 t 次更新量为 $\Delta w(t)$,则更新量变成

$$\Delta w(t) = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial w} \Big|_{w=w(t)} + \alpha \Delta w(t-1) \quad (5.23)$$

式(5.23)中的第二项为瞬时项。至于规格化可以按照下列方式进行:

$$\Delta w(t) = -\gamma \frac{\partial E_p}{\partial w} / \left\| \frac{\partial E_p}{\partial w} \right\| \quad (5.24)$$

式中, γ 为阶跃宽度,它能保持网络结合强度的更新距离一定。不过,由于采用 δ 规则的缘故,多层感知器的学习依赖于网络的构造和初始值,有时会出现陷入局域解的可能性,因此在进行输入输出关系的最优学习时,常常同时采用大范围搜索方法。

2. 神经网络模型

一般来说,相互结合型 NN 中,因为在神经元之间存在反馈回路,所以它是动态的。正因为如此,依据相互结合型 NN 实现联想记忆的研究受到广泛关注。在典型的相互结合型 NN 中,有完全相互结合型的霍普菲尔德网络、输出层与输入层结合的 Jordan 型网络、隐层与输入层结合的 Elman 型网络等几种。

如果再列举其他的 NN 范例,还有玻耳兹曼机器、自组织映像、模块构造型神经网络等。玻耳兹曼机器可以设想是退火法的霍普菲尔德网络的扩展。虽然网络的能量已经被定义了,但是由于导入了概率,此时更新规则显现出来的特点是减小网络的能量未必非要更新不可,这种更新规则的优点在于使求解不至于陷入局域解,而且保证收敛到大范围的稳定点。由康豪南提出的自组织映像是一种根据结合强度向量对输入模式进行分类的无教师学习,属于一种拓扑变换。至于模块构造型 NN,是一种将多个 NN 结合起来的

NN,每个 NN 都履行某个固有的映射,完成专家任务,为了发挥总体功能,它们构成了一个能选择和融合每个输出的门网(gating network),所以模块构造型 NN 有时也被称为 mixture of experts。最适合模块构造型 NN 应用的条件是大规模复杂问题,问题能进一步进行分割,而且各个局部问题均对应着局部专家。另外,采用径向基底函数的神经元适合式(5.10)描述的函数。以此为基底函数的 NN 与上述大于某一阈值后发生的 S 函数不同,它仅由某个输入范围才发生的神经元构成,所以它与把径向基底函数作为隶属函数应用的分层型模糊推理系统是彼此等价的系统。

5.3.3 进化计算

生物通过适应环境、选择环境、改造环境,得以生存下来。进化计算就是在计算机上模仿进化的一个研究分支,按照它的发展历史,可以把它的研究范围分为遗传算法(GA: Genetic Algorithm)、进化规划(EP: Evolutionary Programming)、进化策略(ES: Evolution Strategy)三类。它们基本上采用补解(个体群)集合的多点搜索、遗传操作(交叉(crossover)、突然变异(mutation)等),以及基于适者生存的选择(selection)(图 5.21)。下面就遗传操作(生成各种方法的补解)和世代交替模型(补解选择)加以说明,同时也简要地讲解一下组合最优化和数值最优化的方法问题。

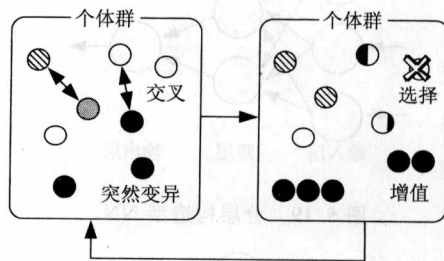


图 5.21 进化计算的个体群的进化

1. 遗传算法

遗传算法(以下简称“GA”),是在遗传基因水平模仿进化过程的最优方法,简单的 GA 由交叉、突然变异、适合度比例选择组成。首先把对象的问题空间变换到遗传基因表达的

符号列空间中,并在该符号列空间中进行搜索。例如,用符号 $\{0,1\}$ 表示补解的个体,于是在遗传基因型空间内就可以靠简单的符号操作进行搜索了。GA的步骤如下:

```
begin
  Initialization
  repeat
    Roulette_Wheel_Selection
    Crossover
    Mutation
    Evaluation
  until termination_condition is True
end.
```

首先是初始化,即随机生成 $\{0,1\}$ 符号列的个体。然后把遗传基因型转换成可以表达的形式,计算适合度。此时,应该将最大化问题视为讨论的主要对象,依据这个适合度,按照适合度比例选择生存个体。所谓适合度选择也称为轮盘选择,设第 i 个个体的适合度为 fit_i ,个体数为 n ,选择概率为 p_i ,则下一代的選擇概率为

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^n fit_j} \quad (5.25)$$

利用上述选择概率挑选 n 个个体,延续下一代的生存。于是,适合度高的个体就可能有更多的子孙遗留在下一代中。不过有人指出,这种方法既然属于概率选择,完全可能出现最优良的个体未被选成下一代的问题,因此建议在多数情况下将遗传算法与良种保存选择(无条件地将最优良个体保留于下一代)两种方法同时并用。接下来是交叉。交叉是指在随机选择的两个个体之间,部分交换遗传信息,生成新的个体,即产生新的补解。再下来是突然变异,它是在维持遗传多样性的过程中随机改变遗传信息的结果。上述一系列过程反复进行,直到满足终止条件为止。关于遗传算法,有人还提出将遗传基因拓展成树状构造的遗传编程方法,或者与人做最优对话的对话型遗传算法等。

2. 进化规划

进化规划(以下简称“EP”)曾是为构建有限状态机而提出的方法,最近它被应用于数值最优化中。基本的EP属于母个体与子个体共存的连续世代模型。设个体数为 n ,按照

方差 σ^2 的正态随机数产生突然变异,生成 n 个子个体。

$$x_{n+i,j}(t) = x_{i,j}(t) + N(0, \sigma^2) \quad (5.26)$$

式中, $x_{i,j}$ 为第 i 个项中个体 j 的遗传基因信息(数值信息)。再考虑适合度的最小化,与个体的适合度状态进行对照,小于正态随机数变化的自适应突然变异为

$$x_{n+i,j}(t) = x_{i,j}(t) + \left(\alpha_j \frac{fit_i - fit_{\min}}{fit_{\max} - fit_{\min}} + \beta_j \right) N(0, 1) \quad (5.27)$$

式中,设 fit_{\min} 和 fit_{\max} 分别为个体群的最小和最大适合度; α_j 为系数; β_j 为偏移量。突然变异后,个体数(包括生成的子个体)增至 $2n$,它适合于竞争选择。各个个体中 W_i 的值按照下列方式进行分配:

$$W_i = \sum_{k \in M} w_{i,k}, w_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{当 } fit_i \leq fit_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5.28)$$

M 是从 $2n$ 个个体中选择出来的 m 个不同的个体集合,也是个体 i 的竞争对手。针对这些竞争对手计算适合度小的获胜次数,按照个体获胜次数多寡的顺序选择 n 个个体,形成下一代个体群。其中,最好的个体必定是相对于其他个体适合度最小的一个,所以它具有良种保存选择的特性。在EP中,交叉被视为突然变异的一部分,所以它只是被潜在地应用。

3. 进化策略

进化策略(以下简称“ES”),大致可以分为 $(\lambda + \mu)$ -ES和 (λ, μ) -ES两类。 $(\lambda + \mu)$ -ES由 λ 个母个体生成 μ 个子个体,包括母个体和子个体的 $\lambda + \mu$ 个个体生存下来的下一代个体群构成连续世代交替模型。 (λ, μ) -ES则由 λ 个母个体生成 μ 个子个体,从生成的子个体中生存下来的下一代个体群,构成离散世代交替模型。特别为人们熟知的是, $(1, 1)$ -ES即随机搜索法, $(1+1)$ -ES即登山法, $(1, \mu)$ -ES和 $(1+\mu)$ -ES即近傍搜索法。研究ES的主要目的是求解多峰值非线性最优化问题,为此还引进正态分布方差的自动调整机制。在 $(1+1)$ -ES中遵循1/5规则,这是指根据过去成功的经验,选择最优步长使突然变异的成功概率为1/5,亦即采用正态随机数 $N(0, \sigma^2)$ 来调整 σ 。这种方法将自身的经历

用于突然变异的自适应,所以也称其为自适应型突然变异。

4. 共进化计算

共进化计算的对象涉及多个不同品种,或者个体群的进化。实施共进化计算时,交叉和突然变异原则上只发生在某一类对象的内部,但是对选择来说,交叉和突然变异也可能发生在一类对象内,或者不同种类的对象之间。不同种类对象之间的表现相当复杂,从共生、竞争,到捕食—被捕食,不过也有共同特征,即个体在某一种类对象内部的适合度是由它与其他种类的个体的关系决定的。也就是说,不同的两个种类的对象 A、B 的个体 x_i 和 y_i 的适合度,分别按照下面的依存关系进行计算:

$$fit_A(x_i) = f_A(x_i, y_i) \quad (5.29)$$

$$fit_B(y_i) = f_B(x_i, y_i) \quad (5.30)$$

在式(5.29)和式(5.30)中,为方便起见取了两个不同的评价函数,实际上可以把它们当作同一件事情进行处理。不过,两种对象的目的存在差异,如同最大化和最小化一样。例如,在某个仿真问题中,希望按照评价函数最大化来确定设计变量,若设计变量为 x_i ,环境条件为 y_i ,按照评价函数最大设计 x_i ,让 y_i 在各种恶劣条件下进化,其结果是,在意想不到的恶劣条件下,都存在最优化的可能性。至于如何求解大规模、复杂的最优化问题,有人提出所谓的共生型方法论,它的基本思想是先将其分割成局部问题,就各种对象对各个局部问题分别进行求解,最后再做全局搜索,找出最优解。

5.3.4 强化学习

在逐步决策的问题中,强化学习是通过智能体从环境中得到的报酬和惩罚,求解能够获得最大累积报酬的策略(policy)的一种方法。在强化学习的基本结构中,智能体观测时刻 t 的状态 s_t ,根据策略 π ,采取行动 a_t 后,转移到下一个状态 s_{t+1} ,取得报酬 r_{t+1} 。向状态 s_{t+1} 转移所获得的报酬 r_{t+1} ,如果只依赖于现在状态 s_t 的行动 a_t ,则被称为马尔可夫决策过程(MDP: Markov Decision Process)。然而,采取某些行动后虽然能够获取报酬,却无法得到更新策略 π 所需的教师信号。因此,

在逐步决策的过程中,为了达到报酬最大化的目标,可以将期望值折扣后构造下列价值函数:

$$\begin{aligned} V^{\pi}(s) &= E_{\pi}\{v_t | s_t = s\} \\ &= E_{\pi}\left\{\sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r_{t+i+1} | S_t = s\right\} \end{aligned} \quad (5.31)$$

强化学习与动态规划法之间有密切的关系,可以认为强化学习是贝尔曼(Benman)最优原理向未知模型拓展的形式。也就是说,在以动态规划为对象的逐步决策问题中,对象即问题的完全模型是给定的,如果报酬的构造也已知的的话,那么由最优理论就可以得出最优策略。但是在强化学习中,面临的对象属于报酬构造未知的问题,所以报酬构造的识别成为目的,它等价于利用这个被识别出来的报酬构造求解最优策略的问题。

因为要识别报酬的构造,搜索最优策略,故强化学习结构的智能体研究被看作是智能机器人研究的一个内容(图 5.22)。下面对具有代表性的 TD 法、Q-Learning 等方法进行介绍。

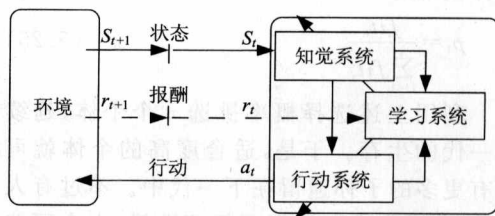


图 5.22 与环境相互作用的智能体的强化学习

1. TD 法

为了对状态价值进行估计,TD(Temporal Difference)法采用了查表法。设 α 为学习系数, γ 为折扣率,可以将状态价值函数更新如下:

$$\begin{aligned} V(s_t) &\leftarrow V(s_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1}) - V(s_t)] \\ &= (1 - \alpha)V(s_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1})] \end{aligned} \quad (5.32)$$

因为 TD 法不依赖于环境模型,所以称之为无模型学习,该方法依据下列步骤进行:

begin

Initialization of value function

Repeat (Episode)

Initialization of state

Repeat

Action selection
 Action
 Perception
 Update value function
 Until state is terminal
 Until termination_contition is True
 end.

首先,状态价值函数被初始化。在逐步决策过程中,将达到目的状态前的一系列决策称作片段,在各个片段中,状态被初始化。智能体依据策略 π 选择行动 a_t ,观测下一个状态,然后更新状态价值函数。在达到终端状态前,智能体将反复进行这种过程。实际上,在不断更新中,学习系数选取得足够小,所以收敛性是能够得到保证的。

Sarsa 根据状态和行动组合对价值进行估计,将 TD 法的状态价值函数扩展成所谓的行动价值函数,给出下面的价值函数更新公式:

$$\begin{aligned} Q(s_t, a_t) &\leftarrow Q(s_t, a_t) \\ &+ \alpha[r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \\ &= (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) \\ &+ \alpha[r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1})] \end{aligned} \quad (5.33)$$

虽然为了获得最优策略,最优价值函数是必要的,不过价值函数要靠策略搜索得到。也就是说,由于 Sarsa 的收敛性依赖于策略 π ,所以必须对策略实施更新。例如,可以借助于 ϵ 贪婪行动选择。这种方法的特点是除了用概率 ϵ 进行随机行动选择,同时还从当前行动价值函数中挑选产生最大估计值的行动。此外,有人还提出了软匹配行动选择等方法。

2. Q-Learning

Q-Learning 属于 TD 学习法的变形,不过在更新策略时,它并未采用行动价值函数,而是将状态和行动组合的价值函数更新如下:

$$\begin{aligned} Q(s_t, a_t) &\leftarrow Q(s_t, a_t) \\ &+ \alpha[r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1}) - Q(s_t, a_t)] \\ &= (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1})] \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$V(s_{t+1}) = \max_{a \in A} Q(s_{t+1}, a) \quad (5.35)$$

这个更新公式与行动的选择无关,它与传统 TD 法的不同之处在于下一个转移状态的最大值 Q 被用于更新。这样的处理虽然简单,因为智能体连续地对行动加以随机选择,显然能求得近似的行动价值函数。

3. Actor-Critic

在 Actor-Critic 中,价值函数和策略被保留下来,把策略(选择行动)设想为 Actor,把价值函数视为 Critic。价值函数适用于与 TD 法类似的方法,而行动选择不需要价值函数,改成依据概率(基于状态 s_t 下行动 a 优选度 $P(s_t, a)$)来进行。

$$\begin{aligned} P(s_t, a) &= \Pr\{a_t = a | s_t\} \\ &= \frac{\exp(P(s_t, a))}{\sum_{b \in A} \exp(P(s_t, b))} \end{aligned} \quad (5.36)$$

式(5.36)中, A 为可能取得的行动集合。若智能体选择行动 a ,则 TD 的误差可以定义如下:

$$\delta_t = r_{t+1} + \gamma V(s_{t+1}) - V(s_t) \quad (5.37)$$

根据 TD 误差公式,设 β 为常数,优选度可以用下式进行更新:

$$P(s_t, a_t) = P(s_t, a_t) + \beta \delta_t \quad (5.38)$$

除了查表法之外,有人还提出利用 NN 对 Actor 和 Critic 进行学习的方法。

5.3.5 智能技术的统一与融合

为了构筑智能系统,有必要将各种方法加以统一和融合。我们来分析一下各种方法的特点。NN 应用到群集或非线性映射中,它的学习能力较强,不过映射关系的性质是属于黑箱的。FS 能比较方便地将人类知识转换成语言规则处理,但是它在本质上不具备学习机制,模糊神经网络能够克服上述所有的缺点。进化计算方法不仅允许试探性地调整 NN 和 FS,还适用于结构最优化。除此之外,靠概率推理和混沌等的统一和融合,还能衍生出各种新的人工智能技术。

福田敏男 久保田直行

5.4 算法理论的行动规划

直到 1970 年前后,当人们谈到机器人的行动规划问题时,还只是涉及机器人位置的各个抽象点的动态规划问题,并不涉及形状特征。这时的机器人路径一般也只限于二维空间。经常充当规划生成系统的例子是“把物体 A 放到物体 B 上”的机器人作业,即目标仅仅涉及逻辑关系的构建^[1]。

进入 20 世纪 80 年代后,多自由度机械手和移动机器人等实际机器人硬件的应用开始普及,这使得人们开始研究机器人的路径探

索问题,相关研究是建立在现实物体集合的前提下的,即物体具有二维或三维形状,机器人的工作空间也是立体的。

由于增加了“具有形状”这个前提,就引发机器人的行动规划的许多固有问题。首先,需要描述形状的几何模型。其次,必须应用这种几何模型进行各种几何计算。一般来说,相关的几何计算都相当复杂,于是高效算法就上升为至关重要的问题。无论依据何种方法,实际上所有的几何计算均可以归结为代数运算,故而计算代数技术变得备受关注。既然涉及形状,机器人就不仅具有位置,而且还具有姿态,以至于被探索的空间维数增加起来。

机器人的行动规划问题涉及诸多的基本技术,具有相当大的难度,这也是众多领域研究者的兴趣所在。算法理论家、计算几何学和计算代数的研究人员,当然还有机器人研究者,都参与到这个领域的研究中来,至今已经提出了许多机器人行动规划的方法,它们大致可以分为两大类:一类重点针对计算的复杂程度给予理论评价(称为算法理论的行动规划);另一类以实用为目的,通过对方法的探求,重点放在改善平均计算时间方面。

本节将介绍算法理论的行动规划。有关涉及上述全体内容的文献,请读者参考 Latombe 编写的教科书^[2], Hwang 和 Ahuja 撰写的综述等^[3]。

下面首先对机器人行动规划的概况进行说明;接着,参考 Latombe 的分类,将机器人行动规划的各种方法归纳为两类加以讲解;然后,特别地对一些已经被证明是十分困难的问题做简单的介绍;最后是归纳和概述。

5.4.1 机器人行动规划问题

首先需要定义若干专业名词。所谓机器人,是指在某个作业环境中活动的物体。例如,它可以被认为是只具有位置的点机器人、具有形状的移动机器人,或者是多关节机械手的总称。机器人活动的空间被称作工作空间(work space)。工作空间一般定义为二维或三维欧几里得空间。工作空间中的物体一般被假定为是固定的,除非在一些特殊的场合,例如,障碍物移动的场合。

能够唯一地描述机器人的位置和姿态的空间,称为构形空间(configuration space)或

配位空间,构形空间中的各点,被称为构形(configuration)。例如,平面内活动的点机器人的构形空间就是平面本身,同样,平面内活动的多角形的构形空间就是表示其位置和姿态的三维空间。对于多关节机械手来说,关节空间就是构形空间,关节数相当于它的维数。

在构形空间中,机器人与其他固定物体互不干涉的构形集合被称为自由空间。构形空间所描述的工作空间中的障碍物被称为 C 障碍物(C-Obstacle; configuration space obstacle)。

根据上述专业名词的定义,我们可以对有关机器人行动规划的问题进一步定义如下:

“当确定机器人的形状、工作空间中物体的形状及其位置和姿态时,生成机器人从初始构形到达目标构形的连续构形路径的问题,称为机器人的行动规划的问题。如果这种路径不存在,实际上就变成有无路径的判别问题。”

总之,无论这条路径如何,只要它存在就足够了。实际上,在一定意义下最优路径问题存在着多个解。但是,从计算量的观点来看,求解最优问题往往都是相当困难的。在本节的后半部分将就针对可能出现的困难问题做一些介绍。

下面介绍两种求解上述定义下的行动规划问题的方法:路径图法(roadmap)和单元分解法(cell decomposition)。

5.4.2 路径图法

路径图法,被定义为“借助于一维曲线,获得机器人在自由空间内连接性的一种行动规划方法”。这条一维曲线就被称为路径图。这里所说的曲线包含线段连接部分。路径图法又称为骨架法(skeleton approach)。在路径图法中又分为可视图^[4]、收缩方法^[5]等。路径图的算法由以下两个步骤构成:

① 构建路径图。

② 在路径图上搜索路径。

第一步,构建一幅可视路径图。在该幅图中,行动规划问题被归纳为决定从初始位置到目标位置路径的图搜索问题。第二步,通过该图上的路径搜索,求出问题的解。粗

略地讲,第一步对应于机器人行动规划的固有问题,第二步则转换成与一般路径搜索相同的问题。

作为例子,这里我们通过收缩方法^[5]对路径图法做一个说明。收缩(retraction)原本属于拓扑学里的学术名词,它的简单涵义是“给出保持某一空间内拓扑信息的一维图形的函数”。

我们来看图 5.23 的例子。设机器人为点机器人,工作空间为平面。

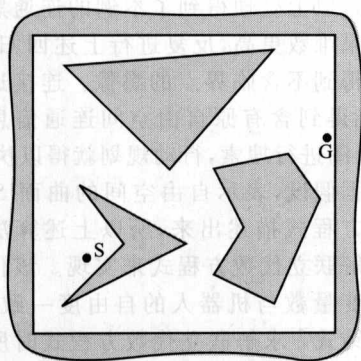


图 5.23 行动规划问题的例子

图 5.23 中 S 为初始构形, G 为目标构形,空白部分为自由空间,有网点的部分为障碍物。这个例子因为适合不同方法之间进行比较,所以在对其他方法进行说明时,也大都采用这个例子。图 5.24 中所示的图称为沃洛诺伊图(Voronoi diagram),它能保存原来空间的连接信息^[5]。

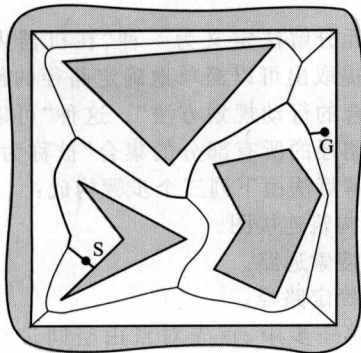


图 5.24 采用收缩的行动规划

换句话说,原来的空间“被收缩到”了沃洛诺伊图中。如图 5.24 所示,初始构形和目标构形与图连接的一种方法是求出与障碍物垂直的远离直线的交点。在本例子中,构建

图形与第一步对应,而在图形上搜索路径与第二步对应。

下面,我们介绍假设机器人为凸多面体,工作空间为三维空间的条件下的一些研究成果。

行动规划的例子如图 5.25 所示。

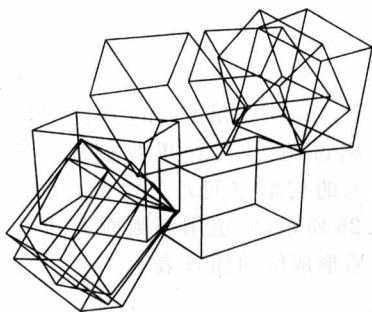


图 5.25 凸多面体的接触行动规划例子

在这种情况下,机器人具有 3 自由度平移和 3 自由度旋转运动,所以它属于六维构形空间。这个研究的最终目的可以看成机械零件装配的行动规划,所以可以将其想像成接触行动规划来进行研究。首先用 2×2 的特殊单位矩阵表示多面体的姿态,其目的是便于用代数式将机器人构形空间参数化,并用代数方程式表示 C 障碍物的边界面。这种 C 障碍物的五维边界面对于多面体之间的点接触,而四维边界面对于线接触,三维边界面对于面接触。虽然无法借助于图形显示六维空间本身,但是通过两个联立代数方程式,或者通过三个联立代数方程式可以分别求解四维边界面或三维边界面,故它最终能够用显式获得解答。结果将表示人工行动约束的代数方程式和上述方程式联立起来求解,就能确定 C 障碍物边界面上的路径图,从而完成接触行动规划。

下面我们来介绍由 Canny 提出的方法^[7],它能普遍适用于一般情况。虽然 Canny 本人把这种方法命名为路径图法,不过 Latombe 却把这个名称归入更普遍的类名,称之为黑像法。大致地讲,黑像法属于一种一般性的方法,它适用于代数方程式描述的 C 障碍物环境下的任意行动规划问题。如果解存在,那么就保证可以找到这个解。这样的行动规划法被称为完全行动规划法。

黑像法所适用的条件是机器人和障碍物的边界面可以通过代数式描述出来,同时,机

机器人的构形空间也能用代数式进行参数化。例如,当机器人和障碍物的形状能够用多面体、圆柱体、圆锥体的组合表示时,那么第一个条件就得到满足。如果机器人是三维刚体,并且其姿态可以用 2×2 的特殊单位矩阵和四维数据进行描述,那么第二个条件也得到满足。一般来说,多关节机器人往往能够满足第二个条件^[7]。

下面这个例子是 Canny 在说明黑像法时曾经引用过的^[7],在这里我们做一个介绍。设机器人的构形空间是三维的,其自由空间如图 5.26 所示,假定用椭圆面上开了一个圆柱形孔后形成的曲面 S 表示。

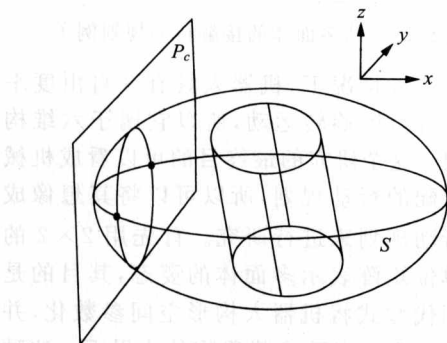


图 5.26 自由空间为封闭包的例子

这里 x 、 y 、 z 各轴对应于机器人的各个自由度。实际的自由空间的形状是非常复杂的,为了便于说明,这里只考虑简单的曲面。根据黑像法的适用条件,该曲面可以用代数方程式表示出来。首先,考虑 $x=c$ 的面 P_c 。一般构形空间是 n 维的,所以它属于超平面。其次,指定适当的方向如 y 轴。于是,在曲面 S 与面 P_c 的交线上存在着使 y 分量极小或极大的点。在交线为若干连接成分的集合的场合,各个连接成分中存在同样的点。当沿 x 轴方向对面 P_c 进行扫描时,便生成这样一些点的轨迹。这个轨迹与曲面 S 投影到 x - y 平面时的黑像是一致的。这就是本方法被称为黑像法的原因。

虽然描述自由空间的原曲面 S 是连通的,但经过上述处理得到的黑像曲线却不连通。连通性发生变化的点称为临界点(critical point),它在扫描面 P_c 上,沿 y 方向进行扫描,可以求出 z 分量的极大值或极小值,即求出 y - z 平面上的黑像,得到的黑像曲线如图 5.27 所示。

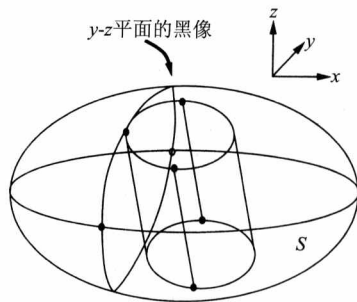


图 5.27 临界点与黑像曲线的连通

通过以上处理得到了本例的连通黑像曲线。如果维数更高,反复进行上述回归处理,迟早会得到不含临界点的黑像。连接这些黑像,就能得到含有原自由空间连通信息的路径图,沿图进行搜索,行动规划就得以执行。

根据假设,表示自由空间的曲面 S 能够由代数方程式描述出来,所以上述算法可以通过求解联立代数方程式来实现。该代数方程式的变量数与机器人的自由度一致,借助多变量结式^[7]求解联立代数方程式时所花费的渐近计算时间与变量的数目成简单指数函数关系。

上述事实表明黑像法的渐进时间计算量是机器人自由度的简单指数函数。同时也表明,黑像法适合解决的行动规划问题的范围很广,而且它能够保证解的全局性。不过,它的缺点是计算量过于庞大,所以目前尚未见到解决现实问题的实际应用报道事例。

5.4.3 单元分解法

单元分解法定义为一种“在机器人自由空间内提取出可以简单地确定路径的部分的所有集合的行动规划方法”。这种“可以简单地确定路径的所有部分的集合”被称为单元。单元分解算法由下列三个步骤构成:

- ① 构筑连接图。
- ② 搜索通路。
- ③ 确定路径。

在第一步中,首先对自由空间进行单元分解,构筑表现单元之间毗连关系的图形,该图形被称为连接图(connectivity graph)。其次,在第二步中,利用图形搜索,求出包含初始构形的单元到包含目标构形的单元的单元序列,该序列被称为通路(channel)。第一步到第二步虽然大体上与上一小节中路径图法

的第一步到第二步的任务相同,但是有一点不同:路径图法是靠一维曲线提取出自由空间的连接性,反观单元分割法,它是靠与构形空间维数相同的单元。因此,为了获得最终的某种行动,必须从通路确定一维路径,这个过程相当于第三步。

在单元分解法中,有完全单元分解法和近似单元分解法之分,不过后者不属于算法理论的行动规划法范畴,所以在本小节中仅对前者进行说明。

给定如图 5.23 所示的行动环境后,根据完全单元分解法的算法可以绘制图 5.28(a)。

在图 5.28(a)中,多面体或三角形的小区域就是所谓的单元。由图 5.28(a)可知,连接各个单元内任意两个点的线段都落在自由空间内,据此“可以简单地确定路径”。这个例子有助于理解单元的定义。就该例子而言,单元可以通过从障碍物的各个顶点引纵向直线的办法来求解。图 5.28(a)表明,所有求出的单元的集合,能正确地描绘出自由空间。这就是该方法被称为“完全单元分解”的理由。另外,基于共有线段长度不为零的单元

之间存在毗邻关系的假设,可以构筑连接图。其结果示于图 5.28(b)中。至此就完成了上述内容的第一步。

搜索通路的例子示于图 5.28(c)中,在连接图中进行搜索,利用发现的信息(例如,障碍物的距离等)就可以形成通路。此即第二步的内容。第三步是确定路径。如果最后决定选择的原则是“通过各单元边界中点的路径”,那么就得到如图 5.28(d)所示的路径。

下面介绍完全单元分解法更一般的应用事例。实际上,Swartz 等曾给出了多角形机器人在多角形障碍物之间移动问题的一个完全算法^[8],假设障碍物的边数为 n ,那么该方法所花费的渐进时间计算量为 $O(n^5)$ 。Swartz 等还给出一种适用于与黑像法前提条件相同的应用场合的一般方法^[9]。他们的一系列研究以搬动钢琴通过狭窄的门框为例,发表了题为“Piano Mover's Problem”的研究报告。实际上,该方法可以归结为与黑像法相同的代数计算,它的渐进时间计算量是关于代数式变量数的二阶指数函数,所以相对于机器人的自由度同样呈现出二阶指数函

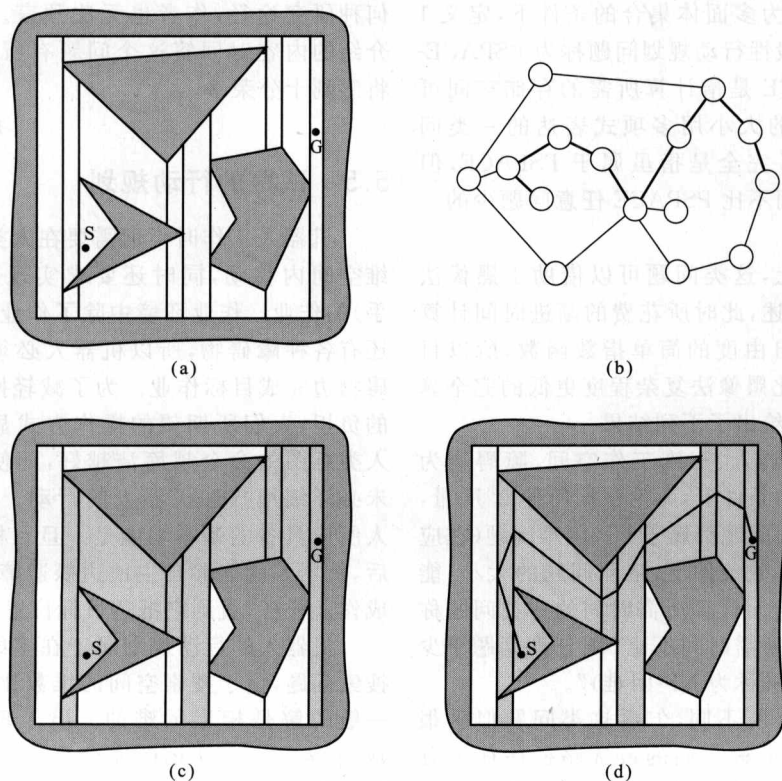


图 5.28 完全单元分解法的行动规划

数的关系。举例来说,如果表示机器人或障碍物的多角形(或多面体)的面数为 n ,机器人的自由度为 d 时,则复杂度为 $O(n^{2(d+6)})$ 。若 $d=3$,得到 $O(n^{512})$,若 $d=6$,得到 $O(n^{4096})$,这是一个非现实的数值。如前所述,黑像法的计算量是关于自由度的简单指数函数,从这一点进行比较,黑像法处于绝对的优势。二阶指数函数或简单指数函数,它们之间的差别不应归咎于路径图法或单元分解法,而是由代数计算的算法差别导致的。应该承认, Schwartz 等的研究成果是人们关于一般行动规划问题解的存在性最早的证明。

5.4.4 若干已得到证明的困难问题

在本节中,我们来介绍几个有关机器人行动规划问题复杂度下限的理论证明成果。当我们面对机器人行动规划问题时,重要的一点是如何基于这些研究成果,充分认识问题的困难性,然后加以处理。

一般认为,有关理论的最初证明是 1979 年由 Reif 给出的下列结果^[10]。

“在机器人为多面体、6 自由度、三维工作空间、障碍物为多面体集合的条件下,定义 1 所给出的一般性行动规划问题称为 PSPACE-完全(PSPACE 是指计算所需的存储空间可以按照问题的大小用多项式表达的一类问题。PSPACE-完全是指虽属于 PSPACE,但所需存储空间不比 PSPACE 任意问题少的一类问题)”。

在理论上,这类问题可以借助于黑像法求解,如前所述,此时所花费的渐进时间计算量是机器人自由度的简单指数函数,所以目前尚未掌握比黑像法复杂程度更低的完全算法。Canny^[7]给出了下列结果。

“在点机器人、三维工作空间、障碍物为多面体集合的条件下,无论根据何种 L^p 度量,求解最短路程问题都属于 NP-困难问题(在应用非决策性机械条件下,依照问题的大小,能够用多项式给出计算所需时间的一类问题称为 NP。计算所需时间不比 NP 任意问题更少的一类问题,被称为 NP-困难)”。

与直觉有所不同,乍看这类问题似乎很简单,实际上求解它们的最优路径往往十分困难。以机械手的行动规划为例, Hopcroft^[11]得到下列结果。

“假设机器人是由旋转关节连接起来的多根杆件,其中一个关节固定,于是工作空间为二维空间。在此条件下判断某关节是否可能从初始构形过渡到目标构形的问题,即 PSPACE-困难(所需存储空间不比 PSPACE 任意问题更少的问题)”。

除了上述这些结果外,有人还证明,多数场合都属于 PSPACE-困难问题,即使采用非决策性机械,有时花费的时间也成指数函数关系。详细内容请读者参见文献^{[2],[3]}。

5.4.5 结束语

本节以基本方法为中心介绍了算法理论的行动规划方法。虽然问题基本上都归结为路径搜索问题,但是由于机器人和作业环境均具有一定的形状,所以几何计算或代数计算在其间起到重要作用。从计算量的观点来说,问题的求解是非常困难的。

从原本上说,机器人就是一种能完成多种作业的通用机械。现在回过头来审视一下,发现要完成通用意义上的行动规划问题,毫无疑问是相当困难的。至于今后应该采取何种研究途径,作者也无法预言。如果本节介绍的内容对回答这个问题有所补益,作者将感到十分荣幸。

比留川博久

5.5 试探的行动规划

机器人工作时不但需要在人类生存的三维空间内移动,同时还要求实现手臂(机械手)的作业。作业环境中除了作业对象以外,还有各种障碍物,所以机器人必须边避开障碍物边完成目标作业。为了减轻操纵机器人的负担,人们所期望的操作方式显然是传达人类意图的命令越简洁越好,即使这些命令未必详细地描述机器人的行动。为此,机器人所应具备的基本功能是一旦目标位置给定后,机器人就能够自主地边躲避障碍物,边完成作业任务,直到它抵达目标位置为止。

机器人的行动规划属于在多维空间内的搜索问题,由于搜索空间的维数比较高,寻求一般的解是相当困难的。出于理论上的兴趣,有人研究了所谓的完全算法,意思是指若解存在,那么依据完全算法就必定能够找到解。不过相关的算法既未拷贝到通用型多自

由度机械手中去,也未应用到实际中。与之相比,受到人们更加广泛关注的是所谓的试探的行动规划方法,虽然它属于不完全算法,不能保证一定会找到解,却能在允许的时间内解决大多数现实问题,其中部分研究成果已经达到实用阶段^[1~5]。这些研究成果考虑了机器人的形状特征和功能特征,或者说考虑了作业环境的性质,因此能够在合理的时间内解决大多数现实问题。本节假设实际作业环境内所有物体的形状和构形均已知,在此前提下开展讨论。

5.5.1 试探的行动规划的基础

机器人的行动属于非线性连续行动,将旋转、平移组合起来在三维空间内行动。为了方便起见,需要在计算机内部将行动离散化后再进行处理。同样地,无论在实际空间内,或者是构形空间内都需要离散化处理。

构形空间(下面简称为“C空间”)是唯一确定移动物体位置和姿态的参数空间^[6]。虽然参数的选择不是唯一的,但是例如,平面内移动的物体,在适当选择坐标系后,就构成由平移运动坐标 (x, y) 和旋转角 θ 组成的空间。如果物体改在三维空间中进行移动,则由3个平移自由度和3个旋转自由度共同构成一个六维空间。在该空间内,用点来表示移动物体。

同样地,环境中的障碍物也可以用空间内的某些区域来表示。如果表示移动物体的点置身于障碍物区域之外,显然两者就不会发生冲突。由此可见,移动物体的路径规划实际上就是在C空间内点的移动规划问题,而它与实际空间内物体的大小和形状无关。机器人操作手是多个构件彼此通过关节连接而成的,靠各个关节的活动,机器人全体呈现出多种多样的形状(姿态),但是以各关节变量为坐标转化到C空间后,机器人就改成用点来表示了。但在实际上,实际环境中的障碍物映射到C空间后,通常形状会变得十分复杂。如果再有多个机器人在同一空间内行动,那么C空间的维数将增加至各个机器人自由度(关节数)的总和。

机器人一次作业行动所需要的实际空间只是整个行动空间的极小部分。此外,回避障碍物的路径也不唯一,通常有多个相位不

同的路径可供选择。因此,如果要求不苛刻,仅限于找到一个合适的路径即可,那么在多数情况下仅就部分空间实施搜索就能满足要求了。不过,因为原来的行动空间维数相当高,所以即使是一部分,也往往意味着是很大的空间,显然这将造成计算量的急剧增大。防止这类问题发生的基本策略有以下两种途径。

① 先搜索路径可能存在的局部区域。以某种近似的方式表示作业环境的构造,然后针对这种构造,从可能存在解的区域着手搜索。此时可能出现两种情况:一种情况是获取对路径可能存在的正确性估计花费的计算时间过长,在极端的场合甚至于会高到与实际路径搜索花费的时间不相上下;另一种情况恰恰相反,正确性估计的近似过于粗糙,虽然缩短了计算时间,却得不到有效的线索。建议此时还不如直接进行搜索为好,因为反正总能得到结果。为了分析空间构造,寻找搜索线索,有时让机器人在三维实际空间中行动,也有时让其在构形空间内行动。

② 在全域进行均等疏网式搜索。如果路径可能存在的区域分散在空间全局中,那么与其针对特定区域进行预测和集中搜索,不如对全域进行均等的、疏网式的搜索更好。这时人们其实已经不再对作业环境的空间构造感兴趣,代之以直接搜索,以便逐步了解空间的性质,并根据情况及时修正搜索策略。

事实上,对路径规划系统的要求是多种多样的。上面列举的种种方法都是有针对性地开发出来的,甚至组合起来使用的。下面列举了一些选择算法的观点。

① 搜索一组可实行解(single query algorithm)。如果在同一环境中只进行一次行动,那么一般不希望对空间进行描述,尽量避免把时间耗费在对环境空间构造的先期搜索计算上,而改成直接对解进行搜索。

② 求解同一环境中的多组解(multi query algorithm)。如果要求在同样作业空间内多次完成各种行动,那么事先进行一定的计算工作就变得必要了,即事先对空间构造达到某种程度的了解,并在此基础上开展高效搜索。

③ 最优解搜索。即依照最短路径、最小

能量路径或最短时间路径等标准展开最优路径的搜索。但是应该记住,除了对待平面内移动机器人这类空间维数较少的行动路径以外,在高维数空间中搜索最优解一般都是十分棘手的。

④ 人类介入示数。基于实用的观点,例如,在工厂生产线应用等场合,制定规划时也可以通过人的介入对那些看似不正确,实际上却可行的路径加以示教,其结果是机器人在行进中肯定能避开障碍物,甚至可以得到更佳的路径规划。

搜索避障路径所依据的基本运算是干涉检查和距离计算。实际上,路径规划所花费的时间在很大程度上与这些计算的时间有关。如果障碍物的图形很简单,仅仅含有少量的面和边,那么在短时间内就可以完成干涉计算。对于复杂机器人,人们归纳了近似程度不同的分层式模型,从简单的形状,到忠实地反映实际形状的图形都有,如果先用简单近似形状模型做干涉检查后,再用更复杂的忠实于原形的模型检查干涉,则所花费的时间可能将会大大减少。距离计算就是求两个物体之间的最短距离。显然,计算两个球体之间的距离最简单,所以可以借助于多个球的逻辑体积和来表示物体,以提高计算距离的速度。

5.5.2 近似单元分割法(网格法)

在多维C空间中,障碍物和自由空间之间的边界面呈现为复杂曲面,正确地描述这种以曲面为边界的空间是相当困难的,近似的表示方法就是将空间离散化,将其分割成许多形状简单的单元,再把单元区分成包含障碍物的区域和不包含障碍物的区域(自由空间单元)。如果给定了任意两个点,只要各个点从所属的单元向着相邻的自由空间单元拓展,来搜索连接两者的路径。在搜索实际路径之前,应该先对所有的空间单元进行一番调查,把不包含障碍物的自由空间单元的毗邻关系记录下来,于是,路径规划问题就可以归结为图形搜索问题。至于图形搜索的方法,有最佳优先搜索、A*算法、双向搜索等。

如果机器人的形状比较简单,并且占有

的空间相对较小,那么可以把它近似成点或球体,问题也就相对容易得到解决。以二维平面内的移动机器人为例,有人提出一种方法,忽略微小的凹凸不平,把二维实际空间中机器人能自由通过的无障碍物区域用长方形或梯形等简单图形近似,将这些图形的重叠部分连接起来即可描绘出自由空间^[7]。如果图形的宽度大于机器人行进的宽度,就表示允许通行。机器人的行进方向变更在图形的重叠部分实施。也有研究报道提出了四元树(四叉树:quadtree)法,对单元分割进行分层处理^[8]。对三维空间中移动和旋转的简单形状的小物体(机器人),甚至可以用八元树(八叉树:octree)近似表示自由空间。有人基于二维平面内运动的机器人和障碍物为多角形的假设条件,开发出在位置和姿态的三维空间 (x, y, θ) 内正确表示障碍物表面形状的方法^[9]。

如果机器人的运动自由度增加(例如,多关节机械手),搜索空间的维数将变高,其结果是描述空间单元属性的毗连关系所需要的时间也将以维数的指数函数形式增加。在大多数情况下,这样计算出来的自由空间单元并不适合实际路径的应用。因此,在关注路径搜索的同时,人们也在研究处理空间单元属性和毗邻关系等的方法。

在C空间(关节角度空间)中试探路径的方法有两种:一种方法是分别从行动初始点和目标点着手检查其毗连空间单元内有无干涉发生,同时以向对方传输波阵面的方式,彼此向自由空间单元领域拓展,如果双方的波阵面产生交集,那么就可以进入其内搜索路径;另一种方法同样是分别从行动初始点和目标点着手进行检查,但它以朝向目标的直线搜索取代了波阵面,一旦碰到障碍物,再开始传输波阵面。由此可见,如果在自由空间单元领域内进行扩展,波阵面会在障碍物面前停止下来中止内部单元的干涉检查,从而避免实施无效的干涉检查。由上述可知,包围障碍物的区域越狭窄,波阵面行进的速度就越快。因此,根据被检查单元的数目与波阵面行进距离之比(图5.29)便可以得知被试探区域的狭窄程度,所以该方法适用于事先检查区域的狭窄程度^[10]。

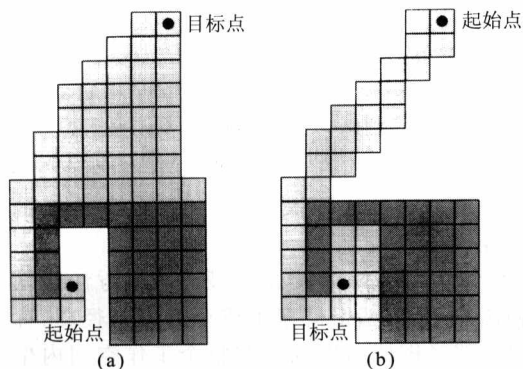


图 5.29 从目标点到起始点的搜索中，
狭窄度不同，搜索效率也不同

如果我们依据图形搜索的典型算法 A* 进行路径试探，需要借助于探索函数对搜索中的单元进行评价，以便让那些评价价值高的单元优先向毗连单元展开。至于单元评价价值的问题，我们虽然可以选择到达目标前的曼哈顿距离，但对于某些空间构造来说这样做可能会产生搜索量剧增的后果。实际上，任何情况下均不存在有效的探索函数。因此，有研究报告指出，可以采用多个不同探索函数并行搜索的方法^[10]。

机器人用操作手操作物体，当它到达起始点或目标点附近时一般都会改用前端手部接近障碍物，不过在多数情况下，需要在更广泛的空间内完成前后切换的中间衔接动作。因此，人们提出利用三维实际作业空间构造特征优先考虑手部避障问题的方法。该方法的基本策略就是将整个实际空间分割成若干个小立方体单元，针对每个单元计算相对于附近障碍物的近似距离，评价空间区域的宽度，以便让手部能够深入到更广阔的区域，并优先沿着该方向在构形空间中进行搜索^[11]。人们还正在研究另外一种试探优先搜索方向的方法，这是把空间分割成从手指尖位置对应的一点向全方位放射的三角锥形单元，然后按照与附近障碍物之间的距离确定优先搜索方向^[12]。

网格法就是在量化多维 C 空间的基础上求解自由空间的体积，然后从中搜索路径。只要是属于试探法，即使搜索领域有限，所涉及的连续自由空间的单元数量也会十分庞大。特别是如果探索法函数评价中存在误差，那么在未将估计过高的误判单元一一剔

除之前，是无法提取出那些路径原本允许通过的单元的。为了减少搜索花费的时间可以将量化的尺度放宽，不过这需要付出代价，即错失路径存在的可能性也将加大。反之，如果仍然按照前面介绍的小量化步长沿毗连单元寻找目标路径，那么搜索所需花费的时间将增加。

5.5.3 路径图法

一维曲线连接图可以给出机器人在自由空间中的拓扑信息。这个图被称作路径图^[2]。给出任意两个点，如果能生成从各个点到附近的路径图的避障路径，那么在路径图内搜索连接若干个连续点的路径，就能够生成连接两个点的避障路径。路径图不在乎疏密如何，只要能够无遗漏地完全覆盖整个空间即可。

本篇的 5.4 节曾经讲过，沃洛诺伊图也能充当路径图，不过随 C 空间维数的增加，生成沃洛诺伊图的操作会变得越来越困难。但是，由于沃洛诺伊图能够比较严格地对附近障碍物的距离作出评价，如果仅要求在周围障碍物安全区域内生成一维避障短的（并非最短的）路径，那么沃洛诺伊图仍是比较方便的。实际上，这样一条一维短路径可以有多个随机解，通过避障路径反复地把附近端点彼此进行连接，就可以形成一个网络，即多维 C 空间中的避障路径网络。它也可以充当路径图。有人在很早以前就给出了这种路径图的生成公式，下面是概率路径图法（PRM: Probabilistic Roadmap Method）的例子^[13]。

在多维 C 空间中，依据概率计算生成一维路径网络，它可能会比较稀疏，但其优点是在全局上无一遗漏。生成路径图的基本算法如下：

① 在 C 空间内随机生成若干个点，检查机器人与障碍物在这些点上是否发生干涉。依次生成无干涉的自由空间内的点集（节点集）。

② 在节点集中选择彼此相近的节点，将它们连接起来，搜索局域无冲突路径。如果局域路径存在，那么这些点是能够连接起来的。把足够数量的节点连接起来，即可生成路径图。否则，应该重复上述步骤①、②的过程。

生成路径图后,如果给定了任意初始点和目标点,那么可以依照下列步骤产生它们之间的路径规划。

③ 从初始点和目标点分别开始,朝路径图上的附近节点搜索避障路径,直至到达这些节点为止。

④ 利用图形搜索方法搜索路径图上能连接这两个节点(初始点和目标点)的路径。

上述步骤①、②可以看作是提取搜索空间的粗略构造。图 5.30 给出概率路径图的概念。

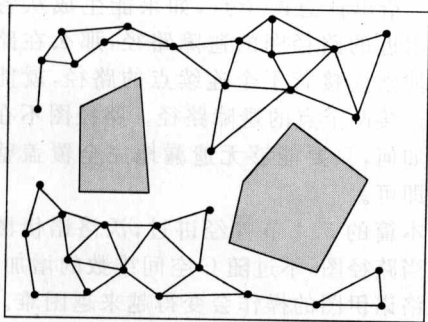


图 5.30 概率路径图(概念图)

由上述可知,C空间中的节点是随机生成的。如果障碍物围成的通路十分狭长,那么路径产生的过程将会变得十分困难。因此,路径图的生成过程应该受到监视,如果连接特定点局部路径的搜索工作屡次失败,就需要判断该点是否位于狭窄通路上。研究人员也针对狭长通路路径图提出了一些生成的方法,例如,随机游动扩展路径图的方法、将附近干涉点距离取半搜索、求解障碍物表面位置、在构造试探空间的同时扩展路径图的方法等。

概念路径图法算法既简单又有通用性,一度在多自由度机械手的行动规划中取得了良好的效果。为此,人们又进一步对其加以改进,提出了一些其他的修正方法。生成路径图需要花费很多时间,如果机器人在同一环境中完成多次行动,那么使用这种方法还算值得;反之,如果只需完成一次行动,就不大合算了。此时建议改用下列办法。

(1) Lazy PRM^[14] 该方法在构成路径图阶段假设随机生成的所有节点与其附近节点之间连接的路径不产生冲突,所以先不做干涉检查的计算。在完成包括以初始点和目标

点为节点在内的路径图后再进行路径搜索。然后,针对搜索路径上的所有节点和节点之间的路径进行干涉检查,将干涉节点剔除,在搜索中不断修改路径。如果有必要,允许向路径图追加随机选择的节点和节点之间的路径。反复进行这种操作,直到形成无冲突的路径为止。

(2) RRT 如图 5.31 所示,该方法是从初始点出发,基于概率生成全方位路径图(称之为路径图树),以取代在整个工作空间内生成无冲突路径图的方法。

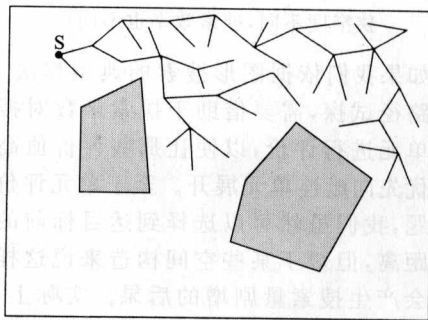


图 5.31 概率搜索树

(3) RRT-Connect^[15] 从初始点和目标点同时双向实施概率搜索,形成路径图树。如果树的端点相连,表示搜索到了连续的路径。有研究报告说,为了生成路径图树,采取随机选择概率的策略和向对方树的端点成长的策略,或组合或依次转换的方式,便可以得到满意的结果。

5.5.4 人工势场

这种方法是靠构建某种人工势场,它可以根据机器人与周边障碍物的距离产生排斥力,或者根据机器人与目标之间的距离产生吸引力,由此生成到达目标的避障路径。这种方法从直觉上很容易理解^[16]。不过,如果实际环境相当复杂,那么就需要花费大量的计算时间才能严格求解出势场的显式表达式,而实际情况往往不允许这样做。所以,往往会人工势场法做各种近似处理。

势场的定义和机器人行动方向的设定可以在三维空间内进行。此时,随机器人关节数(自由度)的增加,计算量仅以线性形式增加。由于可以借助于超声波传感器或光传感器测量机器人与障碍物之间的距离,因此如

果事先将传感器分别搭载在机器人上,这种方法就可以应用到未知环境的实时行动路径规划中。

人工势场法的最大问题是发生机器人陷入局部最小点(local minima)而无法自拔的情况。为了避免这种问题的产生可以尝试采取下列措施:

① 无极大点势场法。

② 依据作业环境构造特征,适当生成若干中间目标点,根据机器人的状态依次转换目标点。如果机器人被抽象为一个质点,无极大点势场法可能会奏效;相反,如果机器人具有一定体积和复杂形状,一旦在搜索中陷入局部最小点,它仍然会无法脱身。如果换成C空间,尽管机器人被抽象为一个点,但是障碍物的形状很复杂,空间维数也高,就很难完成势场的计算。此时如果改用方法②,可能连算法都无法建立起来。在这种场合解决问题的办法可采用措施③。

③ 在实际空间中,按照达到目标的距离和达到障碍物的距离来计算势能,局部地将它变换成多维C空间势能,然后又可以分为两种具体做法:一种方法是沿梯度方向行动;另一种方法是在势能极小点引入随机运动,以便其从极值点逃逸,找出通往目标点的路径^[17]。

上述方法的高明之处在于虽然在C空间内定义了势场,却仅仅是为了提取它的梯度信息,避免在全域的显式计算,因此实现了计算的高速化。下面以二维空间内机器人的行动规划为例做简要说明。至于三维空间的例子,除了将沃洛诺依线图换成沃洛诺依面之外别无异处。

首先,将实际空间离散化,求出与沃洛诺依线图相似的骨架图。图5.32(a)给出部分骨架的放大图。其次,生成从目标点至附近骨架的路径(图5.32(b))。给构成骨架的所有点赋值,该值等于沿骨架至目标点的距离。于是可知,目标点的值即为0,骨架上相邻点上的值为1,其相邻点的值为2,如图5.32(c)所示。最后,从骨架的各个点向周围的各点扩展,由此距离值就可以得出以目标点为最小值的各点的势能(图5.32(d))。如果机器人是质点,那么就可以避开障碍物到达目标。

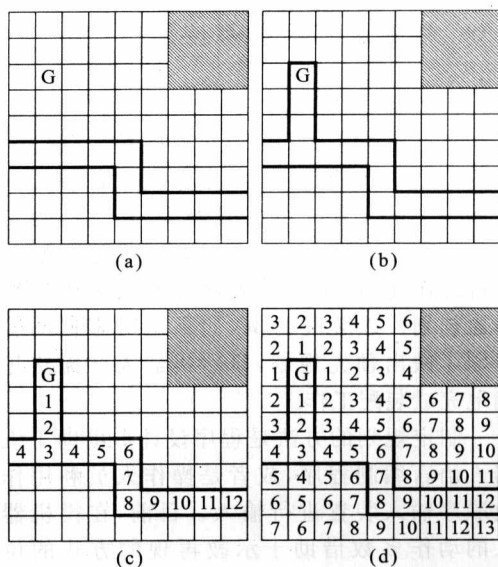


图 5.32 目标为唯一最小值的实际空间的势能

如果给定了机器人的构形,分别计算机器人表面上各个控制点在实际空间位置的势能,然后变换成相应构形下的势能(图5.33)。在附近改变机器人的构形,可以求得若干个势能值,将这些势能值进行比较,就可以得知C空间内的局部势能梯度,机器人只需沿梯度方向行动就可以了。一旦发生机器人停留在极小点的情况,机器人应该产生随机行动以摆脱极小点。反复交替实现沿势能梯度方向的行动和摆脱极小点的行动,就可以到达目标。实际上,如何定义综合变换函数(实际空间内的势能到C空间内的势能)需要技巧,不过这种方法确实比别的方法能更有效地解决困难问题。

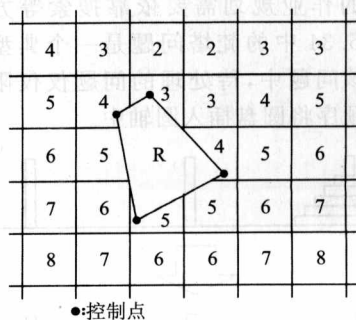


图 5.33 从实际空间的势能到C空间的势能的变换

5.6 作业规划与偏差校正

5.6.1 作业规划

在制造工厂中,机器人最擅长的作业是重复固定的作业任务,类似机械设备装配或拆卸一类的工作。引入机器人,往往能为自动化生产做出重大贡献。机器人在进行装配或拆卸作业时,必须预先对作业的具体工序作出规划。以装配为例,如果未对零件的安装顺序做出预先规划,显然机器人就无法正确地完成装配工作。

制定规划的方法是程序设计员借助于机器人语言编制程序,或者是操作人员利用作业顺序输入装置进行输入。目前,在役机器人的动作多数借助于示教再现的方式的位置控制来实现。示教再现方法在大量生产的现场得到了有效的应用,但是如果用同一条生产线应对少批量多品种产品的生产,由于上述规划方法对人的依赖性太强,大大增加了人的负担。因此,人们期望能有一种自主生成规划的机器人。人们将这种规划作业顺序的工作称为作业规划。所谓作业规划,就是在一定环境制约和作业顺序的约束条件下,求解达到给定作业目标所必需的作业顺序。

5.6.2 作业规划中问题的分级

在作业规划中,需要解决的问题可以分为若干个级别。

在人工智能领域处理作业规划时,历来是采用符号对环境的状态进行描述,这类符号级别的作业规划需要依靠搜索等方法处理。图 5.34 中的梵塔问题是一个典型的例子。在该问题中,待处理的问题仅仅限于遵从何种顺序将圆盘插入圆轴中。

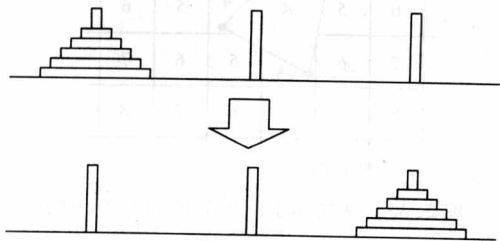


图 5.34 梵塔问题

另外,在制造工厂中为装配作业或设备

保养这类现实系统制定作业规划时,为了应对零件之间接触状态的改变,或者作业中突发事件的发生,事前就应该考虑偏差校正的处置措施。具体地,以机械手解决梵塔问题为例来进行说明。如前所述,虽然允许在作业规划中以符号来记述圆盘和圆轴之间的关系,但实际上,仅仅靠这些信息是无法执行将圆盘从一根圆轴中拔出,再插入另一根圆轴中的作业的。为了实施上述操作,必须制定更详细的作业规划。具体地说,应该包括识别圆轴和圆盘孔的位置的作业,机械手自身或圆盘不与其他圆轴和圆盘发生干涉的移动路径规划作业,利用传感器感知插入时圆轴与孔的位置偏差、在改变接触状态的同时实施插入作业等。

因此,当机器人制定某个目标的作业规划,并打算在现实世界中执行它的时候,有必要将问题的级别抽象成若干层,按照不同的级别来做规划。把对象(即作业)划分为若干个级别,分解为各个简单级别逐级解决问题的方法,被称为问题分解法。

5.6.3 SHRDRU

Terry Winograd 等提出的 SHRDRU^[1]是一种通过自然语言对话制定作业规划的系统。如果限定对象世界,再给定理解该世界所需的全部知识,那么就构成了一个统一语言处理、语义处理、文脉处理的综合语言理解系统。具体地说,该系统的对象世界就是地板上堆积的若干个积木,并用机械手操作这些积木的世界。例如,用户得到“PICK UP A BIG RED BLOCK”的指示,机器人就完成解释和执行的函数。图 5.35 表示 SHRDRU 的执行画面。

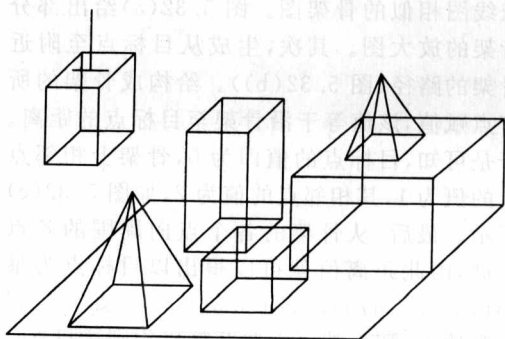


图 5.35 SHRDRU 的执行画面

5.6.4 STRIPS

Nilsson、Raphael 等开发了一种供移动智能机器人 Shakey 使用的作业规划系统,被称为 STRIPS(Stanford Research Institute Problem Solver)^[2]。

STRIPS 属于基于机器人行动引起的状态变化的作业规划系统,给定了初始状态和目标状态,通过搜索连接这两个状态的行动序列来完成作业规划。在这里,记述机器人行动的要素是前提条件(precondition,有关执行行动成立条件必不可少的描述语)、增加表(add list,追加到执行行动所造成的新状态的定理)、删除表(delete list,去除状态的定理)等。制定连接初始状态和目标状态的作业规划的步骤如下:

- ① 检查目标状态定理是否能从初始条件定理推导出来。若答案否定,那么应计算初始状态和目标状态之间的差异,选择能使差异减小的算子。
- ② 选定算子,设定与之对应的子目标,检查算子是否满足前提条件。
- ③ 若满足前提条件,则执行算子,并借助于该算子的增加表或删除表减小差异。
- ④ 若不满足前提条件,那么再次设定子目标,通过递推工程求解问题。

上述方法是在 Newell 和 Simon 提出的一般问题解决系统(GPS: General Problem Solver)^[3]的基础上得到的。选择能减小状态差异的算子,基于递推过程求解问题的方法被称为手段-目标分析法(means-ends analysis)。

为了完成给定的作业目标,Shakey 机器人需要在几个房间之间穿行,执行任务。在此过程中,按照作业规划,它既要回避障碍物,又要推动箱子。Shakey 机器人上搭载有黑白摄像机,然后对所获得的图像进行分析,并与给定的解信息进行匹配。

5.6.5 装配树

装配作业规划是指一种针对装配顺序进行的规划。所谓装配顺序就是零件之间的优先顺序,或者说在装配这个零件之前,不应该处理其他零件。不过装配顺序不是唯一的,可能存在多种答案。在这种情况下,需要根

据装配要求的总时间、装配难易程度等因素,做出评价函数,选择评价价值最高的规划方案。

在符号级别的层次上处理装配作业时,作业顺序可以用如图 5.36 所示的树状结构来进行描述,这种树形结构被称为装配树(assembly tree)^[4]。

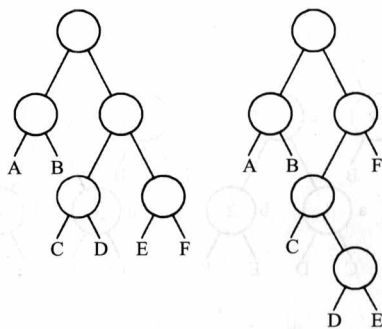


图 5.36 装配树举例

图 5.36 给出一个将 A~F 共 6 个零件装配起来,组合成一台机械的作业示例。在图 5.36 中,树叶对应于各个零件,树枝分叉节点对应于某几个零件组装起来的装配中间状态(subassembly),树根部分对应于最终装配成的机械设备。如果用装配树来表示的话,那么所谓机械的装配作业规划就相当于从树叶(零件)状态开始,采用某种顺序生成节点,并最终获得树根(机械)的问题。相反地,所谓分解作业,是指从树根出发,采用某种顺序生成节点,并上溯到所有树叶的问题。

装配树的结构不止一种,根据途中所要经过的零件装配状态,得到不同种类的装配树结构。图 5.36 左边的装配树表示将 C 与 D、E 与 F 装配后,再将这两个部分装配起来,不过这种顺序不是唯一的。例如,可以先将 D 与 E 装配,然后再把 C 和 F 组合起来也是可行的,这样的装配顺序就产生如图 5.36 右边那样的装配树。

即便对应于图 5.36 左边表示的单一装配树结构,也可以进一步排出如图 5.37 所示的两种装配顺序。节点中标记的数字表示装配顺序。装配顺序 I 是在尽可能不改变作业对象的条件下进行装配的顺序,装配顺序 II 则是边进行小部件的装配,边实现整个机器装配的顺序。采用哪一种顺序,取决于前面提及的评价函数的具体内容。例如,对应于节点 a、b、c 的装配,假设装配的工具相同,那

么由于在顺序 I 中必须先生成 a、b 节点,再生成 d 节点,所以不得不更换一次工具。在顺序 II 中,a、b、c 节点的生成是连续发生的,所以在装配过程中允许不更换工具。如果以工具更换次数的多寡作为评价函数,那么就会选定顺序 II。

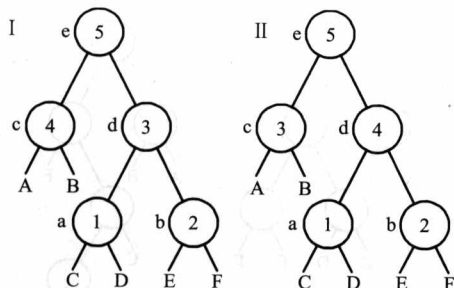


图 5.37 装配顺序举例

5.6.6 AND/OR 图

给定装配树和评价函数后,就能拟定机器人的作业规划了。但是为了让机器人自动生成作业规划,最好是机器人本身具有生成装配树的能力。为此,应该知道零件之间装配优先顺序的信息。机器人获取此类信息的途径有两条:一条途径是通过人机对话系统,由人类把信息传递给机器人;另一条途径是让机器人基于机械几何模型等信息,自动地推演出相关的信息。

如果零件数量很多,那么第一条途径的问题在于需要提供十分庞大的信息量,结果加大了人机交互时人的负担。针对这个缺点,De Fazio 和 Whitney 开发了接触顺序分析法(liaison-sequence analysis method)^[5],据说该方法能将应答信息数量从零件数的平方关系降至 2 倍的关系。

Homem De Mello 和 Sanderson 核对了所有分解的可能方案,提出一种生成装配树的方法^[6]。用这种方法生成的装配树把所有可能的装配树综合成一株树,称之为 AND/OR 图。例如,图 5.36 的两株装配树可以综合成图 5.38 表示的一株装配树。在图 5.38 中,圆形表示零件,四边形表示组件,四边形内记述了构成该组件的零件。

制作 AND/OR 图的方法是从机械的完工状态出发,试探性地将两个部分的所有组

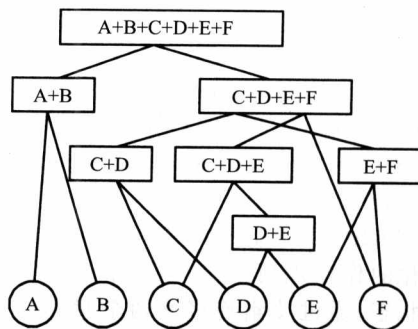


图 5.38 AND/OR 图

件——分解后即可形成。判断分解是否可行的方法是在分解时检查一个零件涉及的空间是否与对方零件涉及的空间发生干涉。

5.6.7 接触状态图

影响实际机器人在符号级别上实施作业规划的一个障碍就是接触。以销轴的插入作业为例来进行说明。在完全不与销孔平面或销孔内侧面发生接触的条件下将销轴插入销孔内,几乎是不可能的。这是因为无论怎样正确地描述对象世界的模型,模型与现实世界之间肯定存在某些偏差。引起偏差的主要原因有机器人与对象物形状模型的不正确性、机械手控制的不正确性造成的手的位置偏差,以及机器人从传感器得来的信息的不正确性等。

应付这种因偏差所产生的问题,有效的办法是实施一边改变接触状态,一边完成插入的作业规划。

细分起来,接触状态又有点接触、线接触、面接触等状态的区分,而这些状态彼此之间未必能够发生直接转移。为了描述接触状态之间的相互关系,我们假设接触状态为节点,用箭头将可以互相转移的节点之间连接起来,便得到所谓的接触状态图。图 5.39 给出一个例子。由图 5.39 可知,从节点 N_1 直接转移到节点 N_2 是可能的,但从节点 N_5 直接转移到节点 N_2 则不可能,必须先经过节点 N_1 、节点 N_3 、节点 N_4 中的某一个后才有可能。

有了接触状态图,通过搜索处理就能够找出采用何种顺序让接触状态从当前状态转移到目标状态最适宜的问题的答案。求解这样的接触状态转移顺序时,为了能够让顺序

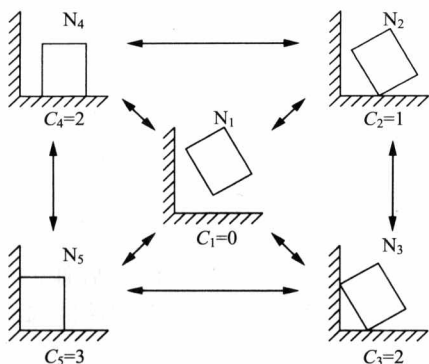


图 5.39 接触状态图

集中满足要求,应该对顺序提出某些评价指标。评价指标之一,如可以用状态转移的难易程度来进行描述^[7]。转移接触状态的行动有下列三种类型:①增强约束度的行动(结合行动);②减弱约束度的行动(脱离行动);③维持约束度不变的行动(维持行动)。这些行动难易程度的设定方针分别如下:

① 在结合行动中,如果约束度增强,转移就变得困难。这是因为增强约束度之后,在多个方向上同时存在约束力的作用,位置控制精度的要求被提高。

② 在脱离行动中,如果减弱约束度,转移就变得容易。

③ 在维持行动中,如果转移经由凸接触状态,或者维持约束度小的状态,那么转移是困难的。

基于上述标准评价函数,可以做如下的处理。设某个节点 N_i 和节点 N_j 之间有箭头,那么该箭头转移的难易程度可以用下式来定义:

$$H_{ij} = W_{ij} \exp(-C_{ij})$$

式中, $C_{ij} (= C_i - C_j)$ 是该转移的约束度的变化量; C_i 和 C_j 分别为节点 N_i 、 N_j 上的约束度。 W_{ij} 是一个由下式定义的加权系数:

$$W_{ij} = \begin{cases} K_{ij}/C_i, & C_j = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, K_{ij} 为根据③决定的适当常数。①、②的标准是通过引入指数函数表示的。

把接触图与评价函数组合在一起让零件向接触状态进行转移,就有可能求解到达目标状态的最优作业顺序。图 5.40 给出了一个规划好的插入作业顺序的例子。

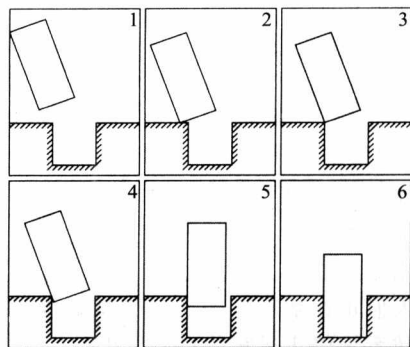


图 5.40 插入作业的规划举例

在本例中,作业规划的世界(环境)只考虑了对象物(销轴和孔),而未考虑移动销轴的机械手的运动。其实在更实际的世界中执行作业规划时,还可以利用机械手本身的运动让零件更有效地转移接触状态,或者反过来,将机械手本身的运动纳入规划内容,避免机械手与对象物的其他部分发生干扰,妨碍了作业。

5.6.8 偏差校正

在实施作业的实际过程中,往往会出现这样的情况,即虽然根据作业规划的方法制定了作业顺序,但由于某些原因,却无法按照正常规划开展作业。如果机器人本身具有检测执行情况重新按照原定作业任务再次规划的能力,那么即使发生了偏差,也能在无人参与作业的前提下继续作业。所谓偏差校正,即借助于某些方法使出现故障的状态恢复到正常状态。

如果我们能预知可能发生的偏差的话,那么就有可能事先将各类误差的对策编排进系统里。因此,实现误差校正功能最基本的方法就是对可能发生的偏差进行分析,并将相应的对策嵌入系统^[8]。该方法的问题在于这种方法会加大研究人员的负担。

另一种途径是事前将所有偏差调查清楚。如果仅限于传统工业机器人一类结构化应用环境,那么这是可能的;但是如果是面对未来机器人-人共存的人类生活环境,由于将遇到许多不确定因素,实际上几乎无法将所有偏差预测出来。实现这类偏差校正功能的困难就在于此。一旦偏差超出预测范围,机

器人的处境或者根本无法检测,或者即使能够检测,也只能让整个系统停下来。

5.6.10 StateNet

5.6.9 基于相似度评价的偏差校正

偏差一旦发生,虽然有时人们无法严格地得知偏差的状态,但是如果能够得知它与已知偏差发生的状态非常相似,就仍然存在着借用以往的经验去对付未知偏差的可能性。人们正在基于这个事实尝试减少由于偏差导致系统停止运转的事件发生。

福田等以在二维平面内插入方形销轴的装配作业为例,提出了一种基于状态类似度评价的偏差校正方法^[9]。为了能够评价当前的偏差状态与已知的偏差状态的相似程度,需要把状态之间的相似度数值化,并制定成评价指标。在他的例子中,把对评价指标有用的信息归纳为销轴与孔的位置关系、销轴所受的干扰力等,把它们代入评价计算公式,就可以实现当前状态与已知状态相似度的数值化。所谓偏差校正方法就是利用相似度计算公式,对当前状态与所有已知状态之间的相似度进行计算,然后针对相似度最高的状态实施校正。已知的偏差校正方法保存在存储器内,如果再有新偏差发生,它们将被保存到存储器的新地址中,以便不断拓展状态转移图。这样,在处理偏差的同时,通过对各种经验的积累,系统结构的鲁棒性得到逐步

增强。

图 5.41 中给出一个身高 30cm、体重 2kg 的小型遥控拟人机器人“Hanzou”^[10]。金广等采用这种机器人编制了一种被称为 State-Net 的偏差校正功能控制系统^[11]。它的功能是在步行中一旦发生前栽倒或后仰倒的情况,机器人都能自主恢复站立,继续行走。

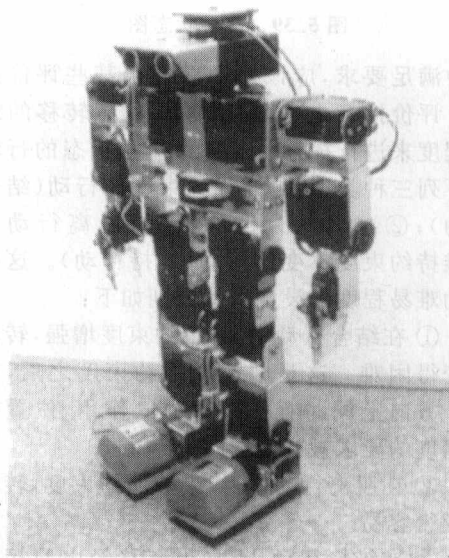


图 5.41 Hanzou(东京大学)

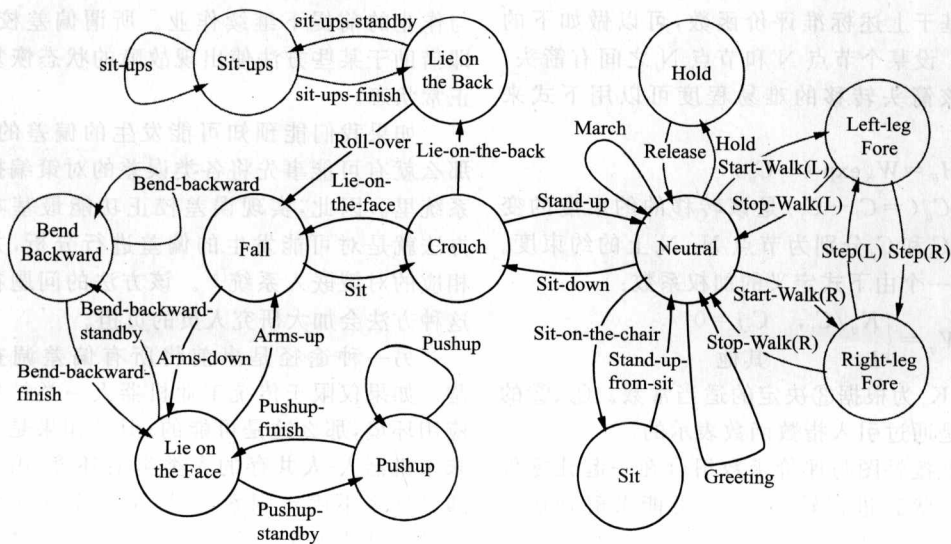


图 5.42 Hanzou 的 StateNet

在 StateNet 中,机器人将来自传感器的信息进行加权,然后用于状态控制。

Hanzou 配备了关节角传感器、地面反力传感器、倾斜传感器等,它们的输出在进行加权后,以向量的形式表示状态。状态之间的相似度是通过两个状态的向量差的范数计算的,其值越小则相似度的评价价值越高。

图 5.42 给出 Hanzou 的 StateNet 的结构。在这个网络结构中,步行包括从前栽倒或后仰倒至恢复站立的动作等一系列恢复动作。在 StateNet 中,如果机器人的状态附有节点,那么箭头就对应于连接节点状态的机器人行动。箭头以状态列向量形式记录执行该行动中间应获取的传感器输入经历,在行动执行过程中,当前传感器输出的状态向量不断与记录的状态向量进行比较。如果比较结果的差值大于某个门限值,就被视为发生偏差,并启动偏差校正机制。如果所发生的偏差未曾被定义过,就会出现无法检测的问题,于是此状态被描述成“无偏差状态”,最终被忽略。一旦测得偏差后,所有节点均要开展相似度评价,并尝试向相似度最高的节点转移,在转移完成后,实施从网络图搜索得到的偏差校正行动序列。

5.6.11 状态相似度评价的问题

上述基于状态相似度评价偏差校正系统的问题在于如何构造评价函数。在福田等的研究中选择了销轴位置、转动的偏离等构成评价向量的各个元素;在金广等的研究中,则选择各传感器的输出构造评价向量的各个元素。不过,这些向量均不具有物理意义,因此由向量差的范数计算所得的评价值与实际的相似度之间不存在绝对关系,这理解起来有一些困难。另外,在提出的任何一种系统评价函数中,都用到若干个评价因素的加权系数,如果这些值的设定不适当,对类似状态就容易出现误判,导致正常的偏差校正无法实施。事实上,确定这些系数都依赖于人为进行,如果需要的话还应该提供调整环节。

金广文男

参考文献

5.1 符号处理与推理

- [1] A. Newell: Physical Symbol Systems (ed. D. A. Norman), Perspective on Cognitive Science, Ablex Publishing Corp. (1981)
- [2] R. E. Fikes and N. J. Nilsson: STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving, Artificial Intelligence, Vol.2 (1971) pp.189-208
- [3] P. E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael: A formal basis for the heuristics determination of minimum cost paths, IEEE Transactions on SSC, vol.SSC-4 (1968) pp.100-107
- [4] 松原仁: フレーム問題をどう捉えるか, 日本認知科学会編集, 認知科学の発展, Vol.2 (1990) pp.155-187
- [5] J. McCarthy and P.J. Hayes: Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence, Machine Intelligence, vol.4 (1969) pp.463-502

5.2 学习

- [1] ロボット工学ハンドブック編集委員会: ロボット工学ハンドブック, コロナ社 (1990)
- [2] Stuart Russell, Peter Norvig 著, 古川康一監訳: エージェントアプローチ 人工知能, 共立出版 (1997)
- [3] 甘利俊一, 外山敬介編集: 脳科学大事典, 朝倉書店 (2000)
- [4] Richard S. Sutton, Andrew Barto 著, 三上貞芳, 皆川雅章共訳: 強化学習, 森北出版 (2000)
- [5] 浅田稔編著: RoboCup Soccer ロボットの行動学習・発達・進化, 共立出版 (2002)
- [6] 中村, 浅田: 運動スケッチ: 画像運動情報に基づく単眼視移動ロボットの行動獲得, 人工知能学会誌, Vol.11, No.6 (1996) pp.905-915
- [7] 銅谷賢治, 川人光男, 春野雅彦: 小脳, 大脳基底核, 大脳皮質の機能分化と統合, 科学, Vol.70 (2000)
- [8] Stefan Schaal: Is imitation learning the route to humanoid robots? Trends in Cognitive Science, ELSEVIER (1999) pp.233-242
- [9] 宮本弘之, 川人光男: 作業レベルのロボット学習のための見まねによる教示, 電子情報通信学会論文誌 J 81-D-II, Vol.10 (1998) pp.2401-2410
- [10] 中村仁彦: 非線形力学系として統合されたロボットの情報処理と制御—運動の制御理論から知能の制御理論へ—, 計測と制御, Vol.40, No.6 (2001) pp.426-432
- [11] M. Asada, Y. Yoshikawa and K. Hosoda: Learning by Observation without Three-Dimensional Reconstruction, Proc. of the 6th International Conf. on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6) (2000) pp.555-560
- [12] Y. Yoshikawa, M. Asada and K. Hosoda: Developmental Approach to Spatial Perception for Imitation Learning: Incremental Demonstrator's View Recovery by Modular Neural Network, Proc. of the 2nd IEEE/RSA International Confer-

- ence on Humanoid Robot (2001)
- [13] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue : Learning by watching, IEEE Trans. on R&A, Vol.10 (1994) pp.799-822
- [14] K. Ikeuchi and T. Suehiro : Toward an assembly plan from observation, IEEE Trans. on R&A, Vol. 10 (1994) pp.368-385
- [15] Stefano Nolfi and Dario Floreano (eds.) : Evolutionary Robotics, MIT Press/Bradford Books (2000)
- ### 5.3 软计算
- [1] 日本ファジィ学会編 : ファジィとソフトコンピューティングハンドブック, 共立出版 (2000)
- [2] J.-S.R. Jang, C.-T. Sun and E. Mizutani : Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice-Hall, Inc. (1997)
- [3] 福田敏男編著 : インテリジェントシステム, 昭晃堂 (2000)
- [4] J.A. Anderson and E. Rosenfeld : Neurocomputing, The MIT Press (1988)
- [5] 馬場, 小島, 小澤 : ニューラルネットの基礎と応用, 共立出版 (1994)
- [6] D.B. Fogel : Evolutionary Computation, IEEE Press (1995)
- ### 5.4 算法理論的行動规划
- [1] N. J. Nilsson : Principles of Artificial Intelligence, Tioga Publishing Co. (1980), 邦訳白井良明ほか訳, 人工知能の原理, 日本コンピュータ協会 (1983)
- [2] J. C. Latombe : Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers (1991)
- [3] Y. K. Hwang and N. Ahuja : Gross motion planning - A survey, ACM Computing Surveys, Vol. 24, No.3 (1992) pp.219-291
- [4] N. J. Nilsson : A Mobile Automaton : An Application of Artificial Intelligence Techniques, Proc. of 1st Int. Joint Conf. Arti. Intelli. (1969) pp.509-520
- [5] C. O'Dunlaing and C. K. Yap : A retraction method for planning the motion of a disc, J. Algorithm, Vol.6 (1982) pp.104-111
- [6] H. Hirukawa, Y. Papegay and T. Matsui : A Motion Planning Algorithm for Convex Polyhedra in Contact under Translation and Rotation, Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation (May 1994)
- [7] J. Canny : The Complexity of Robot Motion Planning, ACM Doctoral Dissertation Awards '87, The MIT Press (1988)
- [8] J. T. Schwartz and M. Sharir : On the Piano Mover's Problem : I. The Case of a Two-dimensional Rigid Polygonal Body Moving Amidst Polygonal Barriers (ed. J. T. Schwartz), Planning, Geometry, and Complexity of Robot Motion, Ablex Publishing Corporation (1986)
- [9] J. T. Schwartz and M. Sharir : On the Piano Mover's Problem : II. The General Techniques for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds, ditto.
- [10] J. H. Reif : Complexity of the Mover's Problem and Generalizations, Proc. IEEE Symp. FOCS (1979) pp.421-427
- [11] J. Hopcroft, D. Joseph and S. Whiteside : Movement problems for 2-dimensional linkages, SIAM J. Computing, Vol.13, No.3 (1984) pp.610-629
- ### 5.5 試探的行動規則
- [1] 長谷川 : 障害物回避, 人工知能学会誌, Vol.5, No.6 (1990) pp.631-736
- [2] J. C. Latombe : Robot Motion Planning, Boston, Kluwer (1991)
- [3] Y. K. Hwang and N. Ahuja : Gross motion planning - A survey, ACM Computing Surveys, Vol. 24, No.3 (1992) pp.219-291
- [4] 比留川 : 経路探索問題 - ロボットの動作計画 -, 情報処理, Vol.35, No.8 (1994) pp.751-760
- [5] 太田, 倉林, 新井 : 知能ロボット入門, コロナ社 (2001)
- [6] T. Lozano-Perez : Spatial Planning : A configuration space approach, IEEE Trans. Comp., Vol. C-32, No.2 (1983) pp.108-120
- [7] R. Brooks : Solving the find-path problem by good representation of free space, IEEE Trans., Syst. Man. Cybern., Vol.SMC-13, No.3 (1983) pp. 199-197
- [8] S. Kambhampati and L. S. Davis : Multi-resolution path planning for mobile robots, IEEE J. Robot. Automat., Vol.2, No.3 (1986) pp.135-146
- [9] R. C. Brost : Computing Metric and Topological Properties of Configuration-Space Obstacles, IEEE Int. Conf. Robot. Automat., (1989) pp 170-176
- [10] K. Kondo : Motion planning with six degrees of freedom by multistrategic bidirectional heuristic free space enumeration, IEEE Trans Robot. Automat., Vol.RA-17, No.3 (1991) pp.267-277
- [11] 長谷川, 音田, 松井 : 作業空間の空間構造解析に基づくマニピュレータの障害物回避動作計画, 計測自動制御学会論文集, Vol.27, No.1 (1991) pp.122-128
- [12] T. Hasegawa and H. Terasaki : Collision avoidance : Divide-and-conquer approach by space characterization and intermediate goals, IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., Vol.SMC-18, No.3 (1988) pp.337-347
- [13] L. E. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe and M. H. Overmars : Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces, IEEE Trans. Robot. and Automat., Vol. RA-12, No.4 (1996) pp.566-579
- [14] R. Bohlin and L. Kavraki : Path Planning Using Lazy PRM, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (2000) pp.521-528
- [15] J. J. Kuffner and S. M. LaValle : RRT-Connect : An Efficient Approach to Single Query Path Planning, IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (2000) pp. 995-1001
- [16] O. Khatib : Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, Int.J. Robotics Research, Vol.5, No.1 (1986) pp.90-98
- [17] J. Barraquand and J.-C. Latombe : Robot motion planning : A distributed representation approach, Int. J. Rob. Research, Vol.10 (1991) pp.628-649

5.6 作业规划与偏差校正

- [1] Terry Winograd: Understanding Natural Language, Academic Press (1972)
- [2] A. Newell and H. Simon: Human Problem Solving, Prentice Hall (1972)
- [3] N. J. Nilsson: Shakey the Robot, SRI Technical Note No.323 (1984)
- [4] 長田正:組立作業手順計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.2 (1993) pp.178-184
- [5] T. L. De Fazio and D. E. Whitney: Simplified generation of all mechanical assembly sequences, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.6 (1987) pp.640-658
- [6] L. S. Homem de Mello and A. C. Sanderson: Planning Repair Sequences using the AND/OR Graph Representation of Assembly plans, Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (1988) pp. 1861-1862
- [7] 吉川恒夫, 横小路泰義, 余永: 拘束状態遷移難度に
- 基づくロボットによる組立作業の計画法, システム制御情報学会論文誌, Vol.5, No.7 (1992) pp.283-293
- [8] Peter Loborg: Error Recovery in Automation- An Overview, AAAI-94 Spring Symposium on Detecting and Resolving Errors in Manufacturing Systems (1994)
- [9] 福田敏男, 中岡政治, 植山剛, 長谷川泰久: 状態類似度評価に基づくエラーリカバリ手法による組立作業の実現, 日本ロボット学会第19回学術講演会予稿集 (2001) pp.1249-1250
- [10] Masayuki Inaba: Remote-brained robotics: interfacing AI with real world behaviors, Robotics Research, Vol.6 (1994) pp.335-344
- [11] Fumio Kanehiro, Masayuki Inaba and Hirochika Inoue: Developmental Realization of Whole-Body Humanoid Behaviors Based on StateNet Architecture Containing Error Recovery Functions, Proc. of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2000)

第 6 章 自主移动

日本有一条谚语“仏作って魂入れず”，意思是说供奉了一尊佛像，却未将灵魂赋予它，缺少了“画龙点睛”之功（相当于“功亏一篑”）。在机器人工程学中，我们可以把机器人的“本体”比作“佛像”，它的“灵魂”，即赋予它聪明行动的点睛之作就是“智能”。本书第 3 篇的第 4 章主要涉及机器人机构和控制方法等内容，实际上相当于上面所提及的机器人的“本体”。在本篇第 6 章中，则进一步研究“自主移动的方法论”，从“魂”的观点来看，这相当于涉及移动机器人的“智能”。

谈及移动机器人的智能，首先事关如何在实际环境中解决导航的问题，这是一个关键问题。此前，有些移动机器人运行在经过特别整理的所谓结构化环境中，相比之下，倒是在人类日常生活环境中运行的移动机器人应该具有更强的能力。不过，同样属于人类生活的环境，与几乎没有障碍物的平直的走廊相比，在有若干个桌椅和人的真实存在环境中行走的机器人，特别是在障碍物杂乱的环境中行走的移动机器人，需要较高的能力。这种更高一级的能力称为机器人的智能。

机器人在环境中移动的关键技术是至关重要的，其中基本的一项是对自身位置的识别能力。设想一下，让机器人进行某项作业时，当下达“从当前位置移动到目标位置”的动作命令后它应该执行什么样的作业呢？显然，它本身首先必须了解“处于该环境中的何处”的信息。换成人类，因为他具有地理位置上的感觉，所以始终知道自己处于房间的何处，或者建筑物的什么位置，不过这并不需要始终清楚知道自己位置的坐标值，倒是另外的能力，即对场景的视觉记忆的能力（从场景提取、抽象、再记忆对象物的空间配置情况），以及辨别自身位置的能力（根据感觉，从当前观察到的场景，获得自身在空间环境中的位置）更重要。换成移动机器人，企图让它具有与人类匹敌的辨别自身位置的能力是困难的

（尽管这是有关它的一个研究课题）。

从本质上说，移动机器人是靠计算机控制的，全部信息经过数值化之后再进入计算机处理。因此，移动机器人的自身位置在本质上是表示成数值的形式进行处理，先将坐标系设定在机器人移动环境空间的某个位置上，然后相对于该坐标系，以数值的形式描述其自身的位置和姿态。移动机器人，特别是车轮型移动机器人（基于车轮旋转移位），应用最多的推测自身位置的方法是里程计法（odometry），它将车轮转数积分，然后推测自身的位置。至于“航位推算”（dead reckoning）这个词，是指从机器人内部传感器的信息推测自身位置的方法（盲导航法），当然里程计法也包含在内。我们知道，现在客运飞机普遍搭载的惯性导航系统（INS）的原理是利用各轴加速度的二重积分计算自身位置的，它是航位推算法的一个例子。“航位推算”是与“天体导航”（star reckoning）相对照的词汇。此前的远洋船舶和 INS 普及之前的飞机，一直是通过观测天体（今天我们也能观测到）在天穹中的实际方位和角度，再结合当时天体运行的相关知识进行实时位置推测的，即所谓的天体导航。现在，全球定位系统（GPS）的应用已经相当普遍了，它是一种利用多颗人造卫星发射的电磁波进行位置测量的系统，可以说它是当代版的天体导航。本章将首先讨论移动机器人的航位推算法（以里程计法为重点），然后再介绍有关 GPS 的概况（参见 6.1 节）。

需要指出的是，随着移动机器人行走距离的增加，里程计法在原理上的累积误差也会累加。建立有关误差的公式将在 6.1 节中进行介绍。为了消除这种累积误差，将利用设置于地面上的标记物作为路标。为了规划达到目的地的运行路径，应该对移动的环境建模，并且最好以数据（地图）的形式表达出来。近年来，有一种研究发展趋势，即让移动

机器人自身自主地完成移动环境的建模任务。所以,在本篇的6.2节中,将就移动环境的建模问题开展讨论。

如果我们对移动机器人的移动环境加以粗略的分类,首先可以分为室内环境和室外环境。室内环境的典型例子,可以举出建筑物内的走廊、整齐划一的办公室等,学者们提供了多篇机器人在这类环境中移动的研究报告。当然,杂乱的环境或障碍物形状不定的散乱环境也是人们感兴趣的研究对象之一。日本阪神大地震之后,人们从中得到教训,已经开展了以灾害现场实用为目标的机器人的研究,关注移动机器人如何在震灾造成的室内家具和物件散乱的环境中行动的问题。本篇在6.3节中,对室内移动机器人的导航问题进行了讨论。

对移动机器人的一部分研究还针对简单的室外环境,例如,社区道路、人行道等开展。虽然这方面的研究报告也相当多,但是对移动机器人的研究仍然以农田苗圃、建设施工现场、星球等不规则的环境为主要应用目标。实际上,汽车智能化和安全化的关键技术中不少内容都与机器人技术密切相关。在本篇6.4节中,扼要地讨论了简单室外环境(对象有院内道路和人行道等)中移动的机器人和汽车自动驾驶的课题。

坪内孝司

6.1 自身位置的识别

对人类来说,以数值的形式,即坐标值来管理自身位置的情况是十分罕见的。不过,机器人进行自主移动时,通常的做法都是借助于环境中的固定坐标系的数值来管理其自身的位置,因为这样做能为计算机处理提供方便。因此,在本节中我们概略地介绍将机器人的各种传感器信息进行融合,以便对自身位置进行推测的方法。

6.1.1 航位推算法

在移动机器人所采用的自身位置识别方法中,航位推算法当数是最普遍的。机器人通过自身对电机等驱动器的输出控制完成移动,因此由输出来测量和推测自身的运动,对控制来说是顺理成章的事情。比较简便的航位推算方法是将移动量的推测结果做累加,以初始

位置为基点,推算当前的位置。设想机器人在路面上进行移动,航位推算的公式如下(考虑到计算机的应用,以离散形式处理):

$$\mathbf{P}[t+\tau] = \mathbf{P}[t] + \tau \begin{bmatrix} v[t] \cos(\theta[t]) \\ v[t] \sin(\theta[t]) \\ \omega[t] \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

式中, $\mathbf{P}[t]$ 为表示时刻 t 时自身的位置和姿态向量,该向量即 $(x[t] \ y[t] \ \theta[t])^T$; τ 为采样的时间间隔,假设它相对于移动速度是十分短暂的; $v[t]$ 为机器人本体的平移速度; $\omega[t]$ 为机器人本体的角速度。 $u[t]$ 和 $\omega[t]$ 可以由机器人的内部传感器(参见第2篇1.2节)测定。航位推算法的种类就可以参考内部传感器的组合情况来进行划分。无论采用何种传感器,只要能够测定出移动量,那么就可以应用式(6.1)的航位推算法进行位置计算。

航位推算法的典型例子可以举出“里程计法”,它在车轮型移动机器人中获得广泛的应用。所谓里程计法,就是一种测量平行的左、右车轮的转数,然后累加出位置的航位推算法。设左、右车轮的回转角速度分别为 u_l 、 u_r ,轮距宽度为 T ,根据里程计法得到机器人的速度为 $v[t] = (u_r + u_l)/2$,而角速度 $\omega[t]$ 可以用 $\omega[t] = (u_r - u_l)/T$ 计算出来。

下面我们来讨论采用航位推算法的位置推测中所包含的误差的性质。在移动量的测量、计算、量化等的误差平均值为0,高斯白噪声建模条件下的误差推测公式可以表示为^[1]

$$\begin{aligned} \Sigma_P[t+\tau] &= \mathbf{J}[t] \Sigma_P[t] \mathbf{J}[t]^T \\ &\quad + \mathbf{K}[t] \Sigma_V \mathbf{K}[t]^T + \Sigma_N \\ \Sigma_P[t] &= E(\Delta \mathbf{P}[t] \Delta \mathbf{P}[t]^T) \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_x[t]^2 & \sigma_{xy}[t] & \sigma_{x\theta}[t] \\ \sigma_{xy}[t] & \sigma_y[t]^2 & \sigma_{y\theta}[t] \\ \sigma_{x\theta}[t] & \sigma_{y\theta}[t] & \sigma_\theta[t]^2 \end{bmatrix} \\ \Sigma_V &= E(\Delta \mathbf{V} \Delta \mathbf{V}^T), \Sigma_N = E(\mathbf{n} \mathbf{n}^T) \\ \mathbf{J}[t] &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{P}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{P}} \right|_{\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]}, \\ \mathbf{K}[t] &= \left. \frac{\partial f(\mathbf{P}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right|_{\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]} \end{aligned} \quad (6.2)$$

式中, \mathbf{V} 为表示内部传感器信息的向量,即 $(v[t] \ \omega[t])^T$, $\Delta \mathbf{P}[t]$ 、 $\Delta \mathbf{V}[t]$ 分别表示 $\mathbf{P}[t]$ 、 $\mathbf{V}[t]$ 的误差; \mathbf{n} 为量化的微小误差; E 为均值运算; f 为式(6.1)的右边,凡符号上部附加有 $\hat{\cdot}$ 的均表示该量的推测值或测量值; Σ_P 为推

测位置的误差协方差矩阵。 Σ_P 的对角元素表示 x 、 y 、 θ 误差的大小,非对角元素表示各个元素之间的误差相关程度。式(6.2)右边第一项表示时刻 $[t]$ 的位置推测误差所造成的下一个采样时刻 $[t+\tau]$ 的位置推测误差因素,式(6.2)右边的第二项表示移动量的测量误差对位置推测误差的影响因素,式(6.2)右边的第三项表示量化等的微小误差因素。根据这个模型,航位推算法对自身位置推测的仿真结果如图6.1所示。

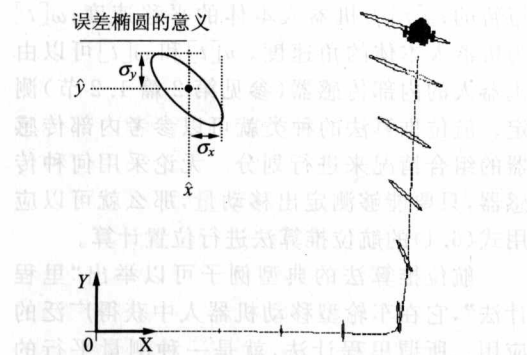


图6.1 航位推算法对自身位置和误差推测的仿真例子(虚线为实际位置轨迹,椭圆中心为推测位置,椭圆大小表示误差大小)

图6.1中的椭圆称为“误差椭圆”,它是基于误差方差矩阵 Σ_P 的、机器人存在概率相同的位置的集合,由下式表述:

$$(P[t] - \hat{P}[t])^T \Sigma_P[t]^{-1} (P[t] - \hat{P}[t]) = D^2 \quad (6.3)$$

式(6.3)是一个关于 x 、 y 、 θ 的三维关系式,属于误差椭圆体方程式,不过在图6.1的误差椭圆中只取 x 、 y 二维表示。在误差椭圆上,长轴方向表示推测位置误差大,短轴方向表示推测位置误差小,轴的倾斜表示元素之间的相关程度。注意观察图6.1误差椭圆扩展的方式,可以发现对于平移方向来说,左右误差变大,而前后误差基本不变。这表明,以行进方向 θ 的误差为主,对横向推测位置精度造成了不良的影响。有人指出引进光纤陀螺仪等高精度传感器测量方位,对减小方位误差会有显著的效果^[2]。再看实际误差分布的情况,它并非是严格的椭圆,不过在满足线性近似的范围内,误差很小,因此由误差椭圆表示误差能够充分地反映误差的性质。一般来

说,建立严格的误差模型并不是办不到,但是却没有必要,因为在处理任意误差分布时将花费很长的计算时间。航位推算法需要边移动边计算,所以减少计算量是十分重要的。如前所述,迄今我们的讨论一直是在二维路面的条件下展开的,不过相关的方法可以扩展到起伏不平的三维路面上,此时航位推算法仍然适用^[3,4]。

航位推算法的基本性质可以总结如下:由于在移动的同时误差有积累的倾向,所以在短距离移动场合,它是有效的;如果换成大范围移动,则应该将其与其他方法结合起来降低误差。

6.1.2 基于外界观测的自身位置推测

由前述我们得知,虽然航位推算法是一种简便有效的位置估计方法,但是仅靠它是无法满足广域连续运行的移动机器人对自身位置进行高精度估计的要求的。此时需要引入另外的传感器对外界进行观测,使其进一步确认自身的位置。确认自身位置的方法,是靠传感器观测环境中已知目标的位置,由彼此的相对位置关系来推算自身位置。专门担此任务的在环境中预先设定位置的目标称为“路标”。对室内环境来说,可以作为路标的具体对象物有墙面、墙角、门、天花板、照明灯等;对于室外环境来说,有建筑物的外墙、马路旁的树木、矮树篱笆等。这些物体在环境中的位置通常都是固定的,机器人预先将它们的位置记忆下来,就可以将其充当路标使用。

一旦将路标用于对自身位置的推测,我们就面临一个重要的问题,即它能提供何种相对位置的信息。为此,首先需要对路标的几何配置进行分类,大体来说可以分为线路标和点路标^[5]。所谓线路标,指那些能用线段近似描述的存在位置,例如,墙面、矮树篱笆等,而所谓点路标,是指那些能用点描述的存在位置,例如,墙角、柱子等。测定与这些路标之间的相对距离和方位,机器人就可以推测并确认自身的位置。

图6.2给出一个相对线路标测定距离的例子,图6.2中表示了如何由线路标得到关于自身位置的信息。

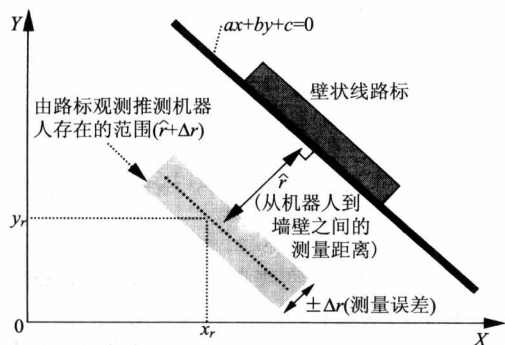


图 6.2 由线路标获得相对位置信息的例子

用计算公式表示图 6.2 所示的关系有下述形式:

$$\frac{|ax_r + by_r + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} - (\hat{r} + \Delta r) = 0 \quad (6.4)$$

由式(6.4)可知,即使假设相对距离的测量误差 Δr 为 0,仅从路标测量无法唯一地确定机器人的推测位置向量 $P_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 。另外,即使能测定机器人与墙壁之间的方位,也只能得到 θ_r ,仍无法唯一地确定位置 (x_r, y_r) 。因此,需要同时对多个路标进行观测,再借助于最小二乘法求解位置。例如,在如式(6.4)所示的例子中,只要求解出能满足下式的 (x_r, y_r) 就可以了:

$$\min_{x_r, y_r} \sum_i \left[\frac{|a_i x_r + b_i y_r + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} - \hat{r}_i \right]^2 \quad (6.5)$$

对于点路标也可以进行同样的分析,在 6.1.3 节中, GPS 就是一种能够给出具体位置的系统,我们将在下面进行详细的说明。

到此为止,我们讨论了如何利用实际环境中原本存在的几何学特征充当路标,推测机器人自身位置的有关方法。如果环境无法提供帮助,那么只有通过强化机器人自身的智能来推测自身的位置,实现自主移动了。不过,在多数情况下,单独路标提供的观测信息还不能唯一地确定自身的位置,而且一旦已知路标与被观测的路标之间在对应关系上出现错误的话,甚至会引发致命的错误,造成危险的后果。如果换成同时观测多个路标,有时又会出现观测和处理时间过长的问題。另外,自身位置识别的精度和可靠性对移动环境中充当路标的对象物的配置也有很大的依赖性。因此,为了确保位置推测的稳定性和精度,人们正在尝试往环境中配置机器人

专用人造路标的研究工作。人造路标有回归反射板(直角折射器)^[6]、偏振光滤波器^[7]、格雷码数字标志^[8]、立体标志^[9]等。实际上,本书 6.1.3 小节介绍的 GPS 也属于室外路标。近年来,有一些研究提出,路标不仅可以用于确认自身位置,而且还能用来记忆作业的顺序^[10]。有关路标推测位置的各种方法,在许多参考文献中都有记载。

测定路标相对位置关系需要依靠外部传感器系统,其中有电视摄像机法、超声波法、激光等光学传感器法等,详细情况请读者参见第 2 篇 1.3 节中有关外部传感器的内容。

前山祥一

6.1.3 GPS(人造卫星定位系统)^[11]

1. GPS 概述

GPS(Global Positioning System)定位是利用人造卫星的定位系统,它可以针对地球上的任何位置进行测量。GPS 定位的基本原理是 GPS 接收机接收由卫星发送回来的电磁波,据此计算卫星到接收机的距离,再以卫星发射出来的位置为基础,推算接收机的位置。

美国早期开发的 GPS 系统(图 6.3)原本是瞄准军事目的,由 24 颗以上的 GPS 卫星分布于约 20 000 km 的高空,约每 12 h 环绕地球一周。现在,它不仅用于军事测量,还被拓展到汽车导航等民用场合。

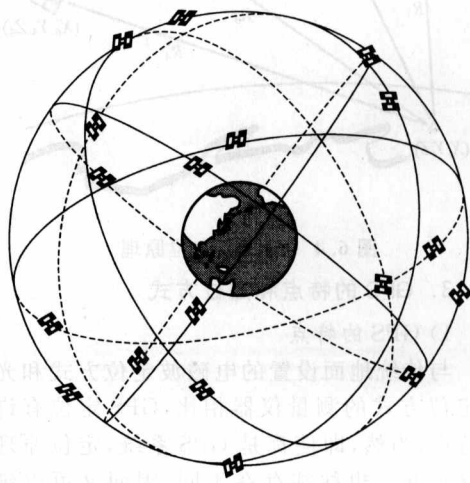


图 6.3 GPS 卫星与轨道

为了正确、高效、精确地进行测量,下面就 GPS 的定位原理和定位方式的分类,以及它的电磁波特性做一些说明。

2. GPS 的原理

GPS 卫星的轨道高度约 20 000km, 环绕地球的周期约 11 小时 58 分, 共有 6 条轨道, 平均每条轨道上有 4 颗卫星, 包含备份卫星在内, 共计卫星数量应该超过 24 颗。

GPS 卫星发送的电磁波有 L1、L2 两个频率。

L1→1575.42MHz(波长约为 20cm)

L2→1227.60MHz(波长约为 25cm)

电磁波采用频谱漫射的通信方式, 由卫星发送。频谱漫射通信方式的特点是抗干扰性强。GPS 卫星的电磁波信号中附有时间标志, 所以可以测量出电磁波从 GPS 卫星发射后到达接收机的时间, 它与同一电磁波的传播速度相乘, 便得到卫星的距离。设该距离为 R , 则 GPS 卫星与 GPS 接收机之间具有下式(6.6)的关系(图 6.4):

$$R_n = \sqrt{(X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 + (Z - Z_n)^2} + Cdt \quad (6.6)$$

式中, X_n, Y_n, Z_n 为卫星的位置; X, Y, Z 为接收机的位置; R_n 为卫星与接收机的距离; C 为电磁波传播速度; dt 为接收机的时钟误差。

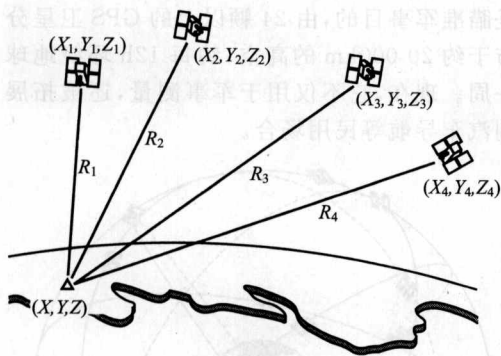


图 6.4 GPS 的定位原理

3. GPS 的特点和定位方式

1) GPS 的特点

与传统地面设置的电磁波定位方式和光学定位方式的测量仪器相比, GPS 定位有许多特点, 当然, 即使都是 GPS 系统, 定位原理和修正方法也往往存在不同, 因而又可以细分为多种定位方式。用户应该根据测量目的和精度来选择 GPS 的定位方式。

(1) GPS 定位的优点

- 可以测量传统方法无法观测的区域。

- 精度在 10m 至数厘米之间, 可进行选择。
- 除了位置, 还可以获得高度信息。
- 测量时间短。
- 测量仪器小型化。
- 适合远距离定位。
- 不受天气影响, 夜间也能定位。

(2) GPS 定位的缺点 卫星发射电磁波方式有下列问题:

- 上空必须开阔(不仅在建筑物中、水中 and 地下均无法定位, 在树林中也无法工作)。
- 建筑物附近存在多路径效应(电磁波反射)。
- 高精度定位需要其他基准站的配合。

2) 方式和精度

如果解除人为误差 SA(Selective Availability), 那么 GPS 定位目前能够达到的精度等级为误差 10m。下面讨论降低误差、提高精度的措施。GPS 定位包含以下误差:

- ① 卫星的时间误差。
- ② 卫星的轨道误差。
- ③ 由电离层延迟造成的电磁波误差。
- ④ 由对流层延迟造成的电磁波误差。
- ⑤ 由电磁波的多路径效应造成的误差。
- ⑥ 接收机噪声造成的误差。

这些误差是随时变化的, 为了保持精度, 必须对它们进行修正。例如, 相对定位方式就是消除误差的措施之一。

图 6.5 给出相对定位方式的示意, 它需要两台以上的接收机。一台放置在已知坐标的地点, 称之为基准站; 另一台放置到测定点, 用来求两点之间的相对位置关系, 称之为移动站。这样, 在计算结果中由电离层、对流

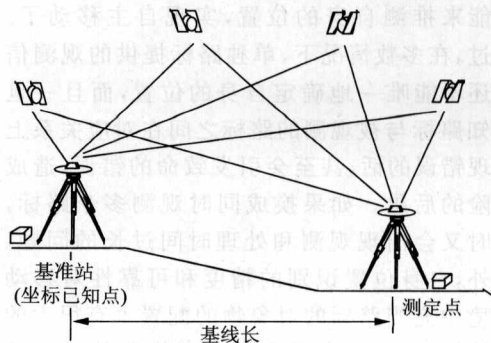


图 6.5 GPS 的相对定位

层等影响造成的电磁波延迟的各种误差得以抵消,实现了高精度定位。

典型的定位方式和特点示于图 6.6 和表 6.1 中。

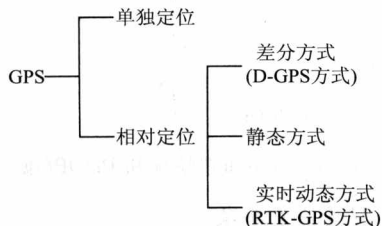


图 6.6 GPS 的定位方式

表 6.1 定位方式及其特点

方 式	位置精度	高度精度
单独方式	10m	精度差
D-GPS	0.5~2m	精度差
RTK-GPS	$10\text{mm} \pm 2\text{ppm} \cdot D$	$20\text{mm} \pm 2\text{ppm} \cdot D$
STA	$5\text{mm} \pm 1\text{ppm} \cdot D$	$10\text{mm} \pm 1\text{ppm} \cdot D$

注: D 为基线长 (m) (基准站与移动站之间的距离);
D-GPS 为差分方式; RTK-GPS 为实时动态方式;
STA 为静态方式。

(1) 单独定位 依照 GPS 的基本定位原理进行定位,它属于最简单的一种方式。但是,它包含着诸如电离层延迟误差等在内的多种误差,所以它的精度最差。

(2) 相对定位 在相对定位中,按照误差消除的方法和信号处理方法的不同又可以细分为几种,如差分方式、实时动态方式和静态方式等。

• 差分定位。利用正确位置已知的基准站进行单独定位,计算基准站的误差,将该误差(修正)信息发送给位于测定点(移动站)的接收机,在移动站修正该测定点单独定位的结果,得到高精度的位置定位。之所以称这种方式为差分方式是因为移动接收机接收了与基准站相同的误差信号,所以应该从测量值中将误差部分剔除,做差分运算的缘故。

• 干涉定位。

① 实时动态方式。

② 静态方式。

与差分方式相同,本方式也属于利用已知固定点的相对定位方式,与差分方式的区别在于接收机中带有电磁波波长测量电路和

处理软件,如图 6.7 所示, GPS 接收机测量由 GPS 发送的电磁波波长,计算电磁波波长的数值。如果知道该波长的数值和相位,由于波长约为 20cm,故很容易算出从 GPS 卫星到接收机的距离。于是根据 GPS 卫星与 GPS 接收机之间的向量,就可以得到移动站与基准站之间的相对位置。

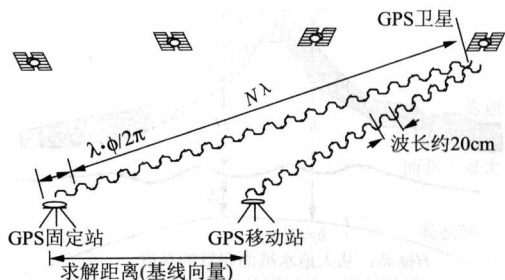


图 6.7 干涉定位的原理图

不过,计算发送来的电磁波波长的数量并非易事,特别是当移动建筑机械或船舶处于移动状态(实时动态方式)下时,求解电磁波波长的数量需要极高的技术。最初求出波长数量的阶段称为初始化。初始化后即可实时(0.2~1s)、连续地输出定位结果了。

相反,静态方式应用于对陆上静止基准点的测量,测量结果也立即可以得到。

4. GPS 的注意事项

1) 坐标系、世界测地坐标系和 WGS-84

虽然从 GPS 接收机可以获得经度、纬度、高度等坐标值,但它们是以 WGS-84 坐标系为基准的。WGS-84 坐标系与日本的国家测地坐标系不仅其椭圆体本身不同,而且椭圆体的中心和轴方向也不同,所以 GPS 的测量结果不能原封不动地照搬到日本国家测地坐标系中,WGS-84 需要通过坐标变换才能转换到日本的国家测地坐标系,而坐标变换软件是由产品开发商提供的(图 6.8)。



图 6.8 坐标变换

2) 高度大地水准面

GPS是根据椭球体(WGS-84)进行测量的,其高度从椭球体的表面开始计算。不过,传统测量依据的标准是水准面,它基本上与大地水准面(geoid)平行。特别是标高,就被定义为从大地水准面测量的高度。在图 6.9 中表示出了标高、椭球体高、大地水准面高之间的关系。

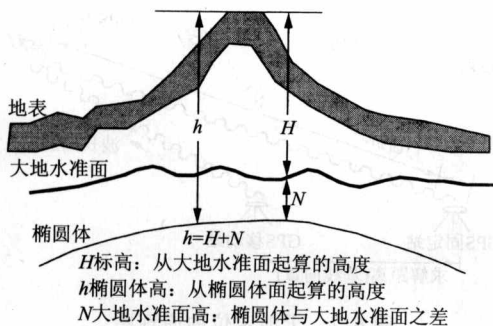


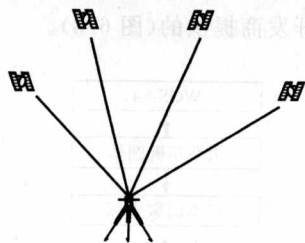
图 6.9 标高、椭球体高、大地水准面高之间的关系

所谓大地水准面,就是“在地球重力的等人工势场面中,与平均海平面一致的平面”。简言之,假想地球表面全部铺满水,它就是这时的水平面。在大地水准面中包含地球旋转而产生的离心力。

GPS测量与传统方法的测量结果之间存在差值,每相距 1km,随地点的不同相差在数厘米以上。如果想通过测量来了解水的梯度变化,那么这种程度的高度误差将会带来一定的问题。这时应该考虑更换水准面测量的基准,或者改变大地水准面。

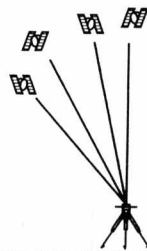
3) 卫星分布

如图 6.10 所示,必须对 GPS 测量卫星进行合理的配置(PDOP: Position Dilution Of Precision),具体说必须至少有 4 颗卫星才能进行定位。



(a)PDOP良好(值为7以下)

图 6.10 卫星布置情况和 PDOP



(b)PDOP不良(值为10以上)

图 6.10 卫星布置情况和 PDOP(续)

4) 测量注意事项

GPS测量的基本原理就是电磁波原理,因此如果无法直接接收来自 GPS 的电磁波,也就无法实现定位。还必须注意建筑物对电磁波的反射(多路径效果),以及高压线、移动电话等的噪声影响(图 6.11)。

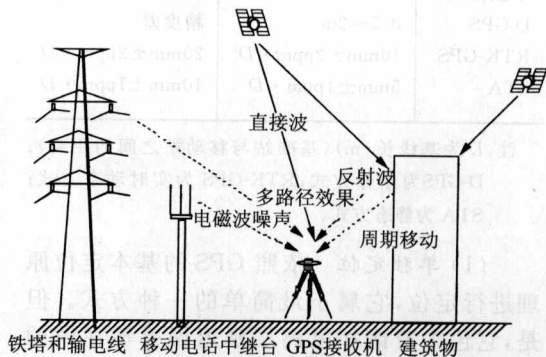


图 6.11 妨碍 GPS 定位的电磁波因素

5. 应用事例

GPS的应用领域不仅仅是测量,它还被广泛地应用在建筑工地的推土机、翻斗车、作业船等的定位,以及汽车驾驶导航、船舶、飞船、宇宙火箭、野营和登山等许多领域。

重松文治

6.1.4 观测误差的修正

如前所述,任何一种推测位置的方法均有长处和短处。对短距离移动来说,航位推算法不失为一种简单有效的方法,但是在进行大范围移动时会失去方向。如果依据外界观测来推测位置,虽然方法受到行动范围的制约较小,但有时无法唯一地确定自身的位置,或者有些信息不可测,或者对环境的依赖性较强。今后在室外环境中,GPS 会有很大的发展前途,不过在建筑物内或街道树荫下,

它就暴露出精度较差的不足,对室内导航来说它根本就毫无用处。因此,人们在掌握各种位置推测法的特长的基础上,正在研究或让彼此取长补短,或者将传感器冗余信息有机地进行融合,从而获得更精确、更可靠的自身位置的推测方法。换言之,这个问题就是如何更好地将现有的推测位置信息(如上述航位推算法、路标观测的结果等)融合成新的观测位置信息。例如,在无法观测到路标的区间内改用航位推算法导航,就是将航位推算法得到的当前位置信息与新得到的路标观测位置信息通过传感器融合后进行估算,从而用公式来解决推测位置的修正问题。

在内、外部传感器融合的位置修正法中,最佳推测法为人们所熟知。我们假定在航位推算的基础上,当前位置和误差的协方差矩阵能用式(6.1)、式(6.2)计算。再假设新观测到的路标测定的误差可以视为平均值为0的高斯白噪声,于是此时基于最佳推测的推测位置及其误差协方差的修正值,可以利用下面的计算公式求出^[12]:

$$\hat{\mathbf{P}}_f[t] = \hat{\mathbf{P}}[t] + \Sigma_f \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{su} \quad (6.7)$$

$$\Sigma_f[t] = \{ \Sigma_p[t]^{-1} + \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \mathbf{J}_p \}^{-1} \quad (6.8)$$

图 6.12 的例子表示由上述计算公式求得的误差椭圆的变化情况,该例与图 6.2 相同,只是与线路标的相对距离经过了重新测定。该例中式(6.7)和式(6.8)的各向量和矩阵的值如下(同时参见式(6.4))所示:

$$\mathbf{J}_p = \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} & 0 \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{su} = \hat{\mathbf{r}} - \frac{|a\hat{x} + b\hat{y} + c|}{\sqrt{a^2+b^2}} \quad (6.10)$$

$$\Sigma_{su} = E(\Delta r^2) = \sigma_r^2 \quad (6.11)$$

下面解释图 6.12 中的修正方法。细线、粗线描绘的误差椭圆分别代表修正前、后推测的位置信息。从路标获得的信息表示相对于墙壁的距离。由椭圆变形的情况可知,修正方法提高了法线方向上相对于墙面的精度。经过修正后,椭圆的中心位置(=推测位置),不仅沿着墙面的法线方向上,而且沿墙面线的平行方向移动。这正是误差协方差矩阵中非对角元素影响的结果。总之,利用路标观测可以实现维数更高的修正。尽管图 6.12 只给出 X-Y 平面上的修正结果,实际上 0

分量同样可以被修正。借助于路标观测,能够直接地对尚未测量的分量进行修正,这是传感器融合的一大优点。至于最佳推测法,它的优点体现在计算量少、能满足实时处理,因此它非常适合边移动边计算位置的作业。

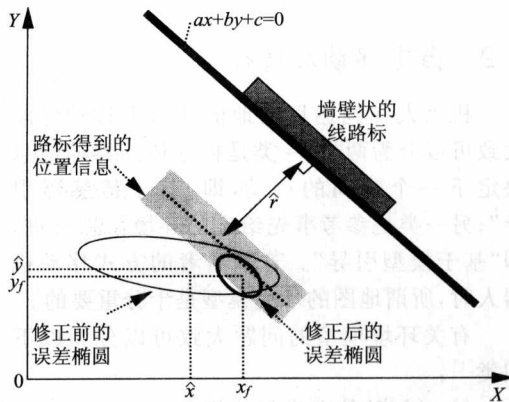


图 6.12 在最佳推测基础上借助于传感器融合的位置推测示例

由 6.1.1 节的式(6.1)和式(6.2)的航位推算模型、式(6.7)和式(6.8)的最佳推测进行传感器融合,其结果能够起到与(扩展)卡尔曼滤波器相同的功能^[13,14]。卡尔曼滤波器通常假设每次观测都做一次处理,而移动机器人的观测多半是断续实施的。是否能够将这种断续观测称为卡尔曼滤波器,的确存在讨论的空间,不过人们人为地将移动机器人自身位置推测,包括这种断续路标观测都称为基于扩展卡尔曼滤波器的自身位置推测法。

实时处理带来的一个问题是路标观测的计算处理和路标对应需要花费时间,所以有人提出利用过往数据的方法^[12]。按照常识,机器人既不可能侵入墙壁,也不可能陷入地下,所以有人建议利用空间有限性的知识进行位置推测,显然这个想法很吸引人^[4,15]。再进一步,有人研究多台移动机器人存在于同一环境中的情况,研究报告指出,通过测定机器人相互之间的位置,能达到比单个机器人移动更高的位置推测精度^[16,17]。

迄今为止讨论的误差修正方法,都是从某个确定的初始位置开始进行计算的。其实,有时会遇到初始位置未知,或者多选一的情况,就如同迷路的儿童要回家一样^[18]。在这种情况下,所谓的 Markov Localization 方法十分有效^[19]。另外,迄今我们讨论的前提都是路标位

置已知,而近年来比较盛行的研究开始转向在假设路标位置未知,或者误差不可忽略的条件下如何推测自身位置和路标位置的课题。有关这些课题的研究进展,在下面的6.2节“自主移动环境模型”中将加以介绍。

前山祥一

6.2 自主移动环境模型

机器人在到达目的地前的自主移动导航大致可以分为两类:一类是根据传感器的信息决定下一个瞬间的行动,即“基于传感器引导”;另一类是参考事先给定的环境信息行进,即“基于模型引导”。若以后者的方式移动机器人时,所谓地图的环境模型是十分重要的。

有关环境模型的问题大致可以分为以下四类^[1]:

- ① 对何种信息进行建模。
- ② 采用何种模型描述环境。
- ③ 怎样产生模型。
- ④ 借助于模型能够达到何种程度的自主行进。

有关模型的利用和自主行走的方法问题,即问题④,将在6.3节的导航内容中加以介绍,所以本节只对①~③的有关问题进行讨论。

6.2.1 模型化环境信息

上述问题①涉及何种信息适合建模的问题,它与问题④有密切的关系,因为它们都直接影响到基于模型的自主行走问题。处理这个问题的方法虽然随环境的不同而各有不同,但一般来说,以地图的形式将环境模型保存下来,它会向机器人行走提供诸多的信息。下面是有关信息内容的一些例子。

- ① 关于墙壁和障碍物等形状的信息。
- ② 关于机器人的路径(可能行走的区域)的信息。
- ③ 确认自身位置和位置修正所需的路标位置和形状信息。
- ④ 关于建筑物和房屋等的名称和代码信息。
- ⑤ 关于行走路面和照明条件等的信息。

6.2.2 环境地图的表示方法

同样地,根据保存信息和利用信息方法

的不同,在处理以什么形式描述环境信息的问题时应该采取的策略也不同。人类生活的现实空间虽然是三维空间,不过对于二维空间中移动的机器人来说,在多数情况下二维环境模型就足够了。因此,这里我们针对二维地图信息,展示一些描述环境模型方法的例子。

1. 向量地图

如图6.13所示,将有关环境信息,如周围物体、行走路线等,作为向量的集合表示在地图上。这样处理的优点是无论地图的精度如何,描述所需的信息量都比较少。其不足点是遇到非多角形物体时,不得不将其化解成许多细小的向量来描述。

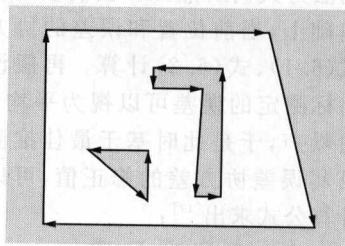
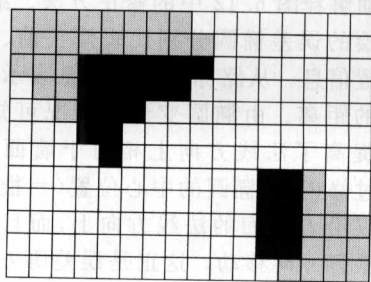


图 6.13 向量地图的例子

2. 网格地图

将环境分割成若干个网格状细小单元,给各个单元赋予各种属性信息,建立起模型内容。如图6.14所示的网格地图用来描述单元内有无障碍物的属性信息,分为①自由空间;②障碍物;③未知这样三类信息内容。表示单元中障碍物占位程度的单元信息图,称为占据地图,它是以网格形式表示的环境地图的典型用法。在这种方法中,地图的精度随网格的大小而定,显然高精度保存大范围地图时,会面临存储容量的问题。



□ 自由空间 □ 未知空间 ■ 障碍物

图 6.14 网格地图的例子

3. 拓扑地图

如果环境地图的重点是描述机器人行走的路径信息,那么多半都采用图 6.15 表示的拓扑地图,它保存了如长度等路径的属性信息和路径之间连接关系等的拓扑信息。这是一种高度抽象化的表现方法,虽然它不是为位置导航提供服务的,不过在长距离的导航中,仍然不失为一种方便的方法。

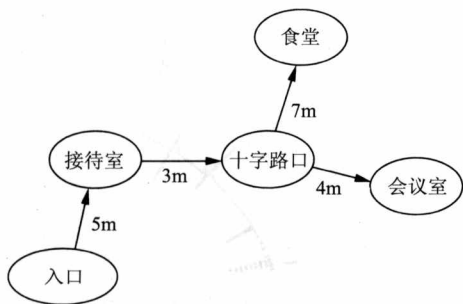


图 6.15 拓扑地图的例子

6.2.3 环境地图的生成

机器人在实际导航之前,必须先生成环境地图。这个任务只要通过导航前的一次运行即可完成,不过如果环境变化了,当然就不得不再次生成地图(如果导航方法嵌入了适应环境变化的对策,在对策适用的范围内就无需再修改地图了)。

1. 人工生成地图

生成机器人环境地图的方法,可以首选人工生成的方法。如果想在地图中保存物体的位置、大小等信息,那么借助于测量器等对它们进行实际测量就可以了。根据付出劳动的程度不同,这种方法总可以让地图的精度达到期望的水平。有时候甚至可以利用手边的方便条件,例如,进行室内导航时,建筑物的设计图或房屋的布置图(简图)往往是现成的,拿来就可以用。当然,必须注意实际环境与设计图是否相符的问题。

2. 机器人生成地图

如果机器人的行动区域很大,人工生成地图就要花费大量的精力和时间,上述方法实际上是不可行的。于是,可以改成让机器人自主生成环境地图^[3]。

1) 传感器信息生成地图信息

该方法对传感器测得的某些点的信息加

以处理,从中提取出环境地图所需的信息。例如,用激光测距传感器进行测量,获得反射点的位置信息,如果将其中的连续直线部分提取出来,就生成环境墙壁的数据。应该强调的是,应该仅仅提取那些机器人可用的信息,并将它标记到地图里。这种方法比人工(机器人的研发者)生成地图操作起来容易,不过让机器人自主行动却并非易事。

2) 传感点的确定

如果环境很宽广,机器人取得一个点的传感数据后,只有接着移动到下一个传感点去,才能继续采样,否则就无法构建环境的全局地图。这就是说,需要确定下一个传感点位于何处。这个点的条件是它应该属于环境中的未测量区域,检测后能够快速计算出位置。等到未测量点全部检测完毕就正好完成了地图的生成过程,不过什么时候完成全部检测必须靠机器人自主地进行判断。当然,确定传感点后,机器人也必须具有达到该点的能力。

3) 地图信息的综合

从多个传感点上采集的地图信息最终应该被综合到同一幅环境地图上。在这幅地图上必须注意被综合信息的相互关系。例如,由机器人里程计法(航位推算法)信息得到的两个传感点之间的相对位置关系中,有必要考虑它们所包含的误差的影响。如果机器人在广域环境中连续探索运行,为了削弱误差随移动累加的效果,人们有时有意地让机器人折回先前某个传感点处进行传感器校验。不过由于误差的影响,无法保证绝对可靠地识别出原有的传感器位置。这个情况,在构建记载几何学形状的环境地图时要特别注意。

3. 由人工和机器人共同生成地图

由上述可知,完全依赖机器人自主生成环境地图是一件困难的事情。因此,出现了一种共同生成地图的方法,即将其中困难的任务部分由人工来分担。例如,在由机器人生成地图时,将 6.2.3 节中的 2) 和 3) 部分的任务交给人工完成,剩余的任务留给机器人实施,共同完成生成地图的任务^[4]。在这种方法中,人工的任务是确定传感点,以及在地图综合中消除测距误差。

4. SLAM

在依靠机器人生成地图时,我们曾经遇到如何消除地图综合信息中的测距误差问题。问题的起因来自机器人位置信息的模糊度对传感器观测到的环境信息的模糊度造成的影响。有一种方法,把全部模糊度放入一个框架内进行处理,通过多次传感信息融合,消除模糊度问题^[5]。这种方法称为SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)。利用概率处理解决模糊度问题的方法也被提出来了^[6]。事实上,近年来SLAM成为地图生成和位置推测研究的一种发展趋势。

5. 机器人地图和用户地图的分离

上面列举的所有方法,都研究如何生成尽量等同于现实世界的地图,以建立环境模型。另一种研究方法则提倡将机器人地图与传统地图进行分离^[7]。这样做的后果虽然可能会导致机器人所生成的地图发生畸变,但是因为在畸变地图上标明了机器人行走的路线,所以参照畸变的地图,机器人实际上仍能在现实环境中正确地行进。不过为了定义机器人的行走路径,研究人员必须出示拓扑关系正确的地图。因此,构建地图基本上分成两大框架:先由机器人生成畸变地图,这个地图已经足以供给机器人导航使用了,至于提供给人们使用的地图,则需要在此基础上修正拓扑错误之后方可完成。图6.16中给出一个让机器人在建筑物群中行走的例子。图6.17表示机器人所获取的地图确实是畸变的,经过拓

扑修正后得到如图6.18所示的用户地图。实际上,在这些地图中,天花板上荧光灯的位置和形状信息也被记载下来。

大矢晃久



图 6.17 机器人地图举例



图 6.18 用户地图举例

6.3 室内导航

6.3.1 引言

为了实现室内自主行走,移动机器人必须根据环境信息和机器人搭载的传感器信息,事先规划出行走的路径和动作,然后一一依照执行。确定行动决策的方法被称为“运动规划”(motion planning)或“路径规划”,至今人们已经提出了很多规划的方法。

在这里,我们依照“是否假定机器人了解环境信息”、“机器人能否正确地获得自身位置”、“是否给定起点/目标位置”三条内容,对移动机器人的规划方法进行分类,得到表6.2。

本节的前半部分,将通过例子对表6.2中的A、B、E进行解释。在后半部分将对有关室内导航最近的研究动向做一些介绍。

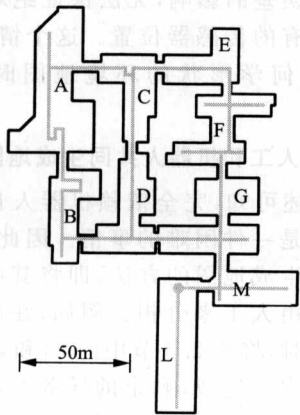


图 6.16 地图描述的建筑物布置

表 6.2 导航的分类

	环境	起点/ 位置	自身位置	机器人 可能采取的行动
A	未知	未知		未知环境搜索 (6.3.4节)
B	未知	已知		基于传感器的导航 (6.3.3节)
C	已知		未知	自身位置辨识
D	已知		已知 (不确实)	自身位置识别 (6.1节)
E	已知	已知	已知 (不确实)	基于模型的导航 (6.3.2节)

6.3.2 基于模型的导航(model based navigation)

如果环境信息、起点和目标位置均已知,而且机器人能正确识别自身位置,那么移动机器人的导航一般通过下列步骤来实现:

- ① 规划行走路径。
- ② 跟踪规划的行走路径实现行走。

在这里,我们特别要把注意力集中到①并对其进行说明。

机器人的行走路径是人工智能的典型研究对象,至今已经提出过各种方法。在这里,我们通过简单的例子对几种基本的路径规划方法加以说明。至于移动机器人行动规划的详细情况,在文献[1]中有详细的阐述。

1. 基于向量地图的路径规划

在为环境对象建立起的向量地图(vector map,参见6.2.2节中的1)中,障碍物被描述成多边形。设障碍物的顶点、机器人的当前位置和目标位置均为节点,与障碍物不相交的节点之间用箭头连接,就完成了所谓的可见图(visibility graph)。机器人的路径规划可以作为该图的图搜索问题处理。

在现实世界中,机器人自身是有一定大小尺寸的,所以让机器人沿紧贴障碍物边缘的路径行走在实际上是办不到的。为了解决这样的问题,我们可以改用构形空间(configuration space),在该空间内重新考虑可见图的问题。

图6.19给出用构形空间描述的可见图和路径规划结果。图6.19中的S是起始点,G是目标点,倾斜的深色网状长方形代表障

碍物,浅色网状长方形表示构形空间内的障碍物(C-Obstacle),粗实线表示路径规划的结果。

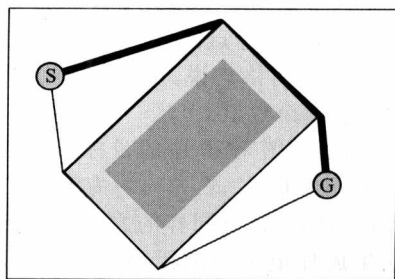


图 6.19 可见图和路径规划

除此之外,单元分解(cell decomposition)方法也可以归入基于向量地图的路径规划,它把环境分割为若干个单元,以单元的中心作为行走路径^[1]。

基于向量地图的路径规划方法比较简单,对处理直线等表示的简单环境非常有效。但是,如果环境中存在曲线和其他复杂形状,由于节点数增多,计算时间将发生爆炸性增加。

2. 基于人工势场法的路径规划

把人工势场的概念引进机器人导航的方法称为人工势场法(potential method)。详细内容可参见文献[1]、[2],这里仅介绍一些概况。

假设机器人受到来自目标点的引力和来自障碍物的斥力的作用,机器人的移动方向可以由这些力的合成向量决定。一旦机器人沿合成向量方向移动了少许路程,就再次做合成向量的计算。反复上述过程,机器人最终可以到达目标位置。

不过,人工势场法有所谓的极小值存在问题,即当机器人到达引力和斥力两者的合力为零的位置后就无法继续生成新的移动向量了,也就是说机器人再也无法规划接下去的通往目标点的行走路径了。

3. 基于占据地图的路径规划

把对象环境划分为若干个细小区域,用每个细小区域是否存在障碍物的信息来描述环境,这样的方法就是占据地图(occupancy map)方法(参见6.2.2节中的2.)。占据地图能近似地表示各种形状的环境,所以在室内导

航环境描述中获得广泛应用^[3]。

将占据地图和人工势场的路径规划方法结合起来产生所谓“距离变换(distance transform)”路径规划法^[4]。该方法先将环境分割成网格,将距离目标点的数据赋予每个网格,这时对每一个网格来说,所谓距离就是周围网格最小的那个数值。

例如,假设图 6.20 中的目标点到周围网格的距离,上、下、左、右方向均为 1,斜方向为 2。从目标点开始,以同样的方法向起始点位置扩展生成环境全局的距离场。然后,从起始位置开始,沿使数字变小的方向连接路径,就能够实现路径规划。

17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	7	8
16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	6	7
17	15	14	13	12					6	5	4	5	6
18	17	16	15	14					4	3	2	3	4
19	18	17	16						3	2	1	2	3
18	17	16							3	2	1	2	3
17	16	15							3	2	1	2	3
16	15	14	13					5	4	3	2	1	2
15	14	13	12	11		7	6	5	4	3	2	3	4
14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	4	5

图 6.20 距离变化法

除此之外,在占据地图路径规划中还可以举出依据环境的复杂程度改变分割方法的所谓“四元树方法”等^[5]。

以占据地图为基础的诸多路径规划的核心问题是精度。网格是描述环境的最小单位,但是我们无法期待它能提供更高的精度。还需要指出的是,目前人们习惯采用方形网格,实际上,在究竟何种网格形状为最佳方面仍有相当大的讨论空间。

6.3.3 基于传感器的导航(sensor based navigation)

如果已知机器人的初始位置和目标位置,而环境信息却未知,那么机器人必须根据搭载的传感器获取信息,在线地确定行走路径。在本小节,我们在假设机器人搭载触觉传感器的条件下来讨论故障算法^[6]。

因为机器人事先不了解环境对象的信息,所以它在假设初始点周围没有障碍物的条件下沿连接初始位置和目标位置的直线前进。一旦机器人在行走中接触到障碍物,它就会改变前进路径,绕开障碍物行走。随避

绕障碍物行走的结束条件不同,行走的路径也不同,在图 6.21 的例子中,恰巧在初始位置与目标位置的连接直线处,机器人中断沿障碍物绕行的行走。这种避障算法,仅用接触传感器即可实现从初始位置到目标位置的行走。

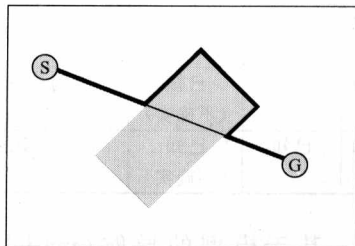


图 6.21 基于避障算法的行动规划

6.3.4 未知环境的搜索

如果机器人的初始位置、目标位置、环境信息均未知,那么它应该采取的行动就是设法获取环境信息。此时,机器人应该根据传感器获取的信息,实时地确定行走路径。未知环境搜索就是借助于传感器信息在线规划行走路径,因此它通常被归入基于传感器的规划类型。但是它有一个鲜明的特点,即没有目标点,因此面对这种情况它必须判断和解决是否对环境全域都完成了搜索的问题。

基于广义沃洛诺伊图实现未知环境的搜索。

未知环境搜索的算法中有一种所谓的广义沃洛诺伊图(generalized Voronoi graph)方法^[7]。所谓沃洛诺伊图,就是在二维平面上用到达两个以上的凸障碍物的等距离点的集合描绘的图。假定机器人上搭载有距离传感器,那么这个方法就能使机器人始终与两个障碍物保持等距离行走,构建沃洛诺伊图。图 6.22 表示了该行动的结果。

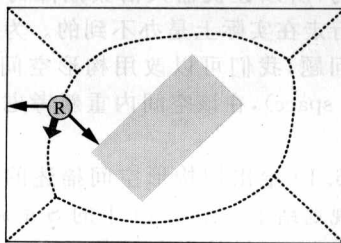


图 6.22 基于沃洛诺伊图的未知环境搜索

基于这个方法,如果环境是相连接的,那么沃洛诺伊图在环境中也是相连的,因此可以证明:搜索未知环境行动的结束,以及可以从沃洛诺伊图上观测到所有障碍物之间的边界。

不过,广义沃洛诺伊图方法的前提是能够获取机器人到两个以上的障碍物的距离,如果在行走路径上有开放空间,以至于无法检测到两个以上的障碍物,那么也就得不到正确的沃洛诺伊图。

6.3.5 室内导航研究的最新动向

以上述移动机器人行动规划为基础,近年来人们就更为复杂条件下的行动规划,以及结合现实的室内导航方法提出了许多方案。本节对相关研究的最新动向做一些介绍。

1. 考虑障碍物冲突危险度的导航

在行走中,机器人需要借助于外界传感器对自身位置进行修正。但是实际上,机器人未必能始终修正自身的位置,一旦修正暂告中断,冲突的危险度就陡然增加。针对这样的情况,有人提出一种规划方案,采用既规划路径,又规划自身位置修正点的方法来构造一个危险度评价函数^[8]。传统路径规划所用到的路径评价函数大多数选择最短距离,不过在上述规划方案中,评价函数改用随行走距离而变化的危险度大。在进行自身位置修正时,该值减小到某个定值。

这种方法把自身位置修正的场所也纳入规划的内容中,在这一点上,可以说该方案对行走条件考虑得更实际了一些。

2. 转向型移动机器人的导航

在多数路径规划中,机器人均被视为点或圆,而且假定机器人能朝任何方向行走(或者就地旋转)。如果不涉及实际行走,限于一般路径规划,这样处理是允许的。一旦移动机器人涉及诸如汽车那样的转向动作,它行走的空间就会受到约束,所以有必要考虑转向型移动机器人的路径规划问题。

解决这个问题的方法之一是用最小回转半径和与之连接的直线来表示行走路径^[9]。如果用这种圆弧和直线能够构建起路径,那么转向型移动机器人就能够沿着这个路径行走。

另一个方案是将允许行走的区域向构形空间进行投影,然后在投影区内进行行动规划^[10]。

由上述可知,人们正针对转向型移动机器人的导航问题进行着各种探讨。

3. 障碍物移动环境的导航

至此讨论的导航方法都是以静态环境作为对象的。实际上,机器人在现场进行移动时,环境中往往存在移动的障碍物。因此,目前针对障碍物移动环境的导航研究十分盛行。

例如,有人提出一种“障碍物移动向量导航法”^[11]。根据这个方法,如果已知移动障碍物的移动向量,就可以在以时间轴为纵轴的三维空间中描述障碍物。于是机器人的行动规划可以作为路径规划问题来考虑。不过,由于机器人移动的实际速度存在上限,在制定行动规划时应该考虑到这个因素。

利用障碍物移动向量导航法时,可以借助于仿真来模拟移动机器人在多个移动障碍物之间穿行的行走动作。不过,在实际的环境中正确地获得障碍物的移动向量是相当困难的,所以目前还无法实现实际环境中的实验(图 6.23)。

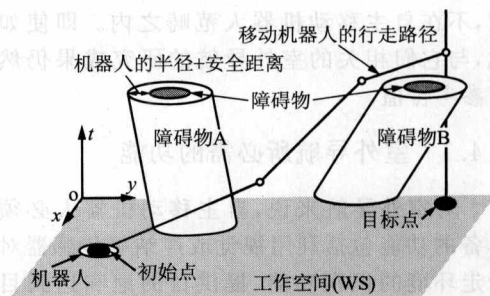


图 6.23 在障碍物移动环境中移动机器人的路径规划

4. 室内导航的实用化

利用本节介绍的路径规划或室内导航方法,已经有不少移动机器人在实际环境中实现了稳定运动,实用事例逐渐被报道出来。

例如,移动机器人的实用化先驱可以举目前已经在工厂达到实用化的AGV(Automated Guide Vehicle,无人搬运车)。不过,它尚属于一种忠实地沿事先敷设的磁带路径行走的设备,对环境变化等的适应能力并不

太强。

夜间执行警戒任务的移动机器人也达到了实用化^[12]。这种机器人掌握事先设定的路径信息和环境信息,在行走的同时借助于外界传感器修正自身的位置。但是,它不具备自动生成路径的能力。

由此可知,能适应环境变化等的机器人的智能行动尚处于发展阶段,还未达到真正的实用化。但是,我们可以期待今后在这方面研究的进一步开展,以便在各个领域实现移动机器人的实用化。

永谷圭司

6.4 室外导航

室外环境指社区内的道路,它们不在道路法规的限制之列。如果跟在操作者的后面亦步亦趋,机器人沿人行道行走是不成问题的,就如同婴儿车和电动轮椅一样。按照交通法规,人行道的步行速度不得高于时速 6km/h。因此,我们将研究的条件限定为室外导航的环境是人行道和社区道路,自主移动机器人的时速低于 6km/h。

应该指出,高安全性汽车(advanced safety vehicle)和智能交通系统(ITS: Intelligent Transport Systems)属于汽车自动驾驶的研究,不在自主移动机器人范畴之内。即使如此,与它们相关的室外导航的研究成果仍然有参考价值。

6.4.1 室外导航所必需的功能

对室外导航来说,自主移动机器人必须具备的功能包括利用视觉或声纳等传感器对行走环境的识别功能、提供目的地和达到目的地的路径的地图信息功能、提供机器人当前位于地图何处的当前位置检测功能、对垃圾箱和路旁绿化带的回避功能,以及移动时遵守交通法规,不与车辆和行人发生冲撞的安全功能。

在提供地图信息和当前位置检测功能方面,汽车导航和自主移动机器人导航是相同的,但是在行走环境识别和交通安全功能方面两者有区别,前者是由司机完成,后者则交给机器人完成。另外,两者对位置精度的要求也不同。汽车导航地图或当前位置精度有 10m 就足够了,相反,在人行道上移动的机器

人的定位精度要求厘米级。因为汽车导航系统已有 10 年左右实用化的历史,所以有关汽车导航系统地图匹配的原理和术语在移动机器人室外导航研究中也采用。

室外导航时必须识别行走环境,检测移动物体。图像处理属于高维识别处理技术,因此它很适合这种场合。室外环境因季节、时间、气候不同,照明会发生变化,图像处理技术不仅需要对照明有鲁棒性,避免受到对象距离的影响等之外,还必须在 100~500ms 内完成高速处理,以便顺利地将各种背景与移动物体分离开来。

1) ITS 的环境识别

ITS 的车载处理系统上一般用多台摄像机完成道路识别、前行车辆和障碍物的检测、交通标志识别、司机状态识别等任务。例如, VITAII 就有 18 台摄像机。下面对它们做一些简要的介绍。

(1) 道路识别 道路识别任务多半是检测线路左右的白线。如果没有白线,就改成检测道路的边缘。自主移动机器人的身高不算高,如果位居线路中央行走会对交通造成障碍和危险,所以只有在不得已的情况下才允许它跨白线行走。此时,ITS 的白线检测法就变得有用了。

(2) 前行车辆的检测 为了检测前行车辆,可以在画面上开一个窗口显示道路前方数十米处的状况,根据车辆后视图像的对象属性、牌照识别等知识,对车辆进行检测。但是,如果机器人沿人行道和人行横道进行移动,车辆就不限于正面相对了,往往只能看到车辆的侧面,人行道的局部有时还会被挡板遮掩,此时对象属性或车辆牌照的识别对自主移动机器人的车辆识别图像来说是没有帮助的。

(3) 交通标志识别 路边的规定标志、交通信号、可变显示板、路面标志等都具有一定的模式,所以可以借用于文字识别的方法。一般来说,依次颜色滤波器、位置滤波器、尺寸滤波器的顺序确定标志候选物,经过二值化和再标定后,即可通过模式匹配或特征分析予以识别。上述 ITS 的标志识别方法在自主移动机器人中都适用。

2) 模仿低等动物的环境识别

有一种环境识别的方法是利用符号模式识别对象。符号模式(以下简称为“SP”)的概

念来源于动物行为学的符号刺激,低等动物并非通过三维形状来识别所关心的对象,而是根据对象固有部分的特征^[2]。SP是符号刺激的工程学词汇。SP方法的优点是符号处理时间很短,所以适合自主机器人应用。

(1) 人行道的 SP 人行道的 SP 是沥青人行道上的路边石块和凸字地砖,以及用瓷砖砌成的人行道图样等。判断有无瓷砖图样有助于判断是否有障碍物。晴天时,树木会向人行道周边的建筑物或路旁投射阴影,它们有时会造成 SP 检测的困难。但是,如果机器人的航位推算系统十分有效,那么在多数情况下只要把基于 SP 的位置修正设置在数米以内就不会发生什么问题。

(2) 行人的 SP 如果移动体与路面接触的根部的明暗周期变化在 1s 左右,而步幅约为 0.5m,那么就可以将该移动体视为行人。这个明暗时间的变化周期在头部、手、腿处均能呈现出来,但实际上是脚部最明显。这种 SP 最容易通过图像处理被检测出来,与天气、距离、行人的衣着全然无关^[3]。

(3) 车辆的 SP 显然,直射日光,甚至空中的散射光线均无法到达汽车车体的正下方,只有从周围发出的些许斜射光线能到达这里。从视频信号上看,正下方的这块阴暗大体表现为噪声电平,在图像上构成一个黑暗区域。与此相反,树木和建筑物的阴影区域因为仍然会受到空中散射光的照射,所以即使是阴天这些区域也比汽车正下方的区域显得明亮。如果在图面上沿道路移动的黑暗区域的宽度大致与车辆的宽度相同,那么就可以将它视为汽车的 SP^[4]。这种 SP 在观测点位于 1m 附近的高度处才有效,所以同样适合应用于自主移动机器人。

3) 路标

为了让机器人获取当前位置信息而设置的视觉标记称为路标(下面简称为“LM”)。设置 LM 的条件有三点:①位于路径附近且固定;②与周围物体相比,在明亮程度、色彩、大小、形状方面均有明显区别;③被障碍物遮挡的机会小^[5]。十字路口的人行横道标志、交通标志、招牌等都满足上述条件。至于招牌文字的识别,由于字体不统一,视角倾斜时文字还可能发生变形等缘故,目前解决起来还比较困难,它无法派上用场。

6.4.2 地图信息

自主移动机器人的尺度大致相当于人行道环境或社区环境内行走的轮椅大小,通常采取直线行走、圆弧行走、自旋回转等模式。如果是直线行走或圆弧行走,一般都在路面上沿着朝行走方向延伸的 SP 行走。在行走路径中具有相同行进方法和相同 SP 的区间称为行径(pass)。行径端点和行径中间可以设置 LM。LM 有三个作用:①对招牌或交通标志能起到位置确认的作用;②人行横道标志或停止线能起到机器人定位的作用;③电梯信号显示盘或交通信号能起到出发、停止标志的作用。机器人的地图信息是一个网络结构,行径的端点为节点,行径被赋予箭头属性。从初始点到目标点的路径用一个路径序列表示,称之为路径信息。路径信息是通过在网络进行路径搜索而得到的^[6]。

1. 位置确认

如果机器人基于路径信息导航,用航位推算法行走,由于车轮的滑动等原因,位置和方向会逐渐发生偏差。

(1) 基于 SP 的位置偏差修正 在路径信息中,假设 SP 和机器人的距离为 D ,导航时用图像处理测量 SP 与机器人之间的距离,然后进行位置偏差修正。在图 6.24 中,设航位推算法求出的机器人位置和方位分别为 (X_i^p, Y_i^p, Dir_i^p) 。设轮距中点 o 为原点,机器人的正方向为 y 轴, x 轴与 y 轴正交且向右方向伸展构成坐标系。坐标系 oxy 称为机器人坐标系。设图像处理求得的机器人坐标系的 SP

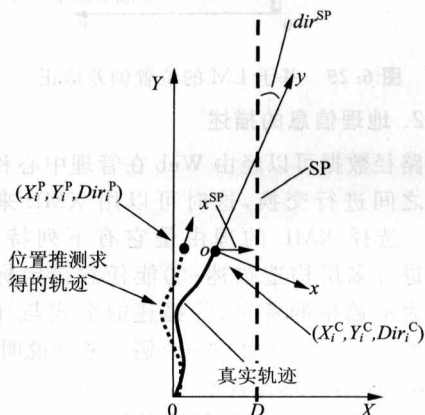


图 6.24 基于 SP 的位置修正

的距离为 x^{SP} , 方位为 dir^{SP} , 修正后的位置 ($X_i^{\text{C}}, Y_i^{\text{C}}$)、方位 Dir_i^{C} 可以写成下列形式:

$$X_i^{\text{C}} = D - x^{\text{SP}}$$

$$Y_i^{\text{C}} = Y_i^{\text{P}}$$

$$\text{Dir}_i^{\text{C}} = \text{dir}^{\text{SP}}$$

(2) 基于 LM 的位置偏差修正 位置偏差修正时可以利用路面上的 LM。在图 6.25 中, 设示教时 LM 的观测点为 ($X_{\text{LM}}^{\text{T}}, Y_{\text{LM}}^{\text{T}}$), 方位为 Dir^{T} , 并设在机器人坐标系中图像处理检测出的 LM 基准点的位置与方位为 ($x^{\text{T}}, y^{\text{T}}$)、 dir^{T} 。导航时机器人停止在航位推算求出的 LM 观测点处, 然后用图像处理检测 LM。设在机器人坐标系中基准点的位置和方位分别为 ($x^{\text{E}}, y^{\text{E}}$)、 dir^{E} 。导航时 LM 观测点的位置 ($X_{\text{LM}}^{\text{E}}, Y_{\text{LM}}^{\text{E}}$) 和方位 Dir^{E} 可以由下式求出:

$$X_{\text{LM}}^{\text{E}} = X_{\text{LM}}^{\text{T}} + x^{\text{T}} - x^{\text{E}} \cos(\text{Dir}^{\text{E}})$$

$$- y^{\text{E}} \sin(\text{Dir}^{\text{E}})$$

$$X_{\text{LM}}^{\text{E}} = Y_{\text{LM}}^{\text{T}} + y^{\text{T}} + x^{\text{E}} \sin(\text{Dir}^{\text{E}})$$

$$- y^{\text{E}} \cos(\text{Dir}^{\text{E}})$$

$$\text{Dir}^{\text{E}} = \text{dir}^{\text{E}} - \text{dir}^{\text{T}}$$

这种方法称为基于 LM 的位置偏差修正。

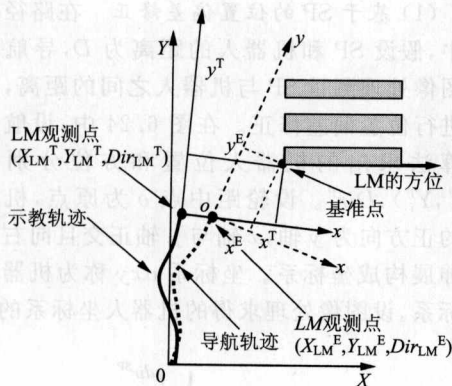


图 6.25 基于 LM 的位置偏差修正

2. 地理信息的描述

路径数据可以经由 Web 在管理中心和机器人之间进行交换, 这时可以用 XML 来描述^[7]。选择 XML 的理由是它有下列特点: ①能进行多层构造描述; ②能任意设定标签以便表示数据的意义; ③描述的形式与计算机机型无关等。下面举一个例子进行说明。

XML 描述的路径数据 说明

<PathData> 路径数据起点

<Header> 文件标题开始

..... (形成日期、版本)

</Header> 头文件结束

<LM> LM 数据开始

..... (名称、种类、位置、检测参数)

</LM> LM 数据结束

<Path> 路径数据开始

..... (路径的始端、终端、导航法种类、道路宽度、铺装、交通规则等)

<SPInfo> SP 数据开始

..... (种类、间隔、检测参数)

</SPInfo> SP 数据结束

</Path> 路径数据结束

..... (LM 数据和路径数据的反复)

</PathData> 路径数据结束

3. 地图信息示教

有三种方法生成由 SP、RM、导航法组成的路径数据库: 第一种方法以电子地图或纸面地图为基础生成数据库。但是, 目前市场上销售的地图并不包含现成的符号模式和路标描述。还有一点, 日本县、市、镇、村绘制的道路地图, 虽然道路数据记录得很详细却未公开, 形式也不统一, 因此这种方法并非最佳选择。第二种方法用土木测量仪器测量符号模式、路标, 以及行走过程。但是为此测量一个路标点至少要花费大约 10min 的时间, 而且即使土木测量仪器能够胜任测量, 也未必能用图像处理进行测量, 所以它也没有多大的实用价值。第三种方法是在机器人实际行走的过程中, 不断检测路径的始端和终端坐标、符号模式、路标等, 记录它们的种类、参数等^[7]。机器人由操作人员手动操纵, 符号模式和路标也由操作人员自行选择。上述操作称为路径数据的示教。这种示教完成后, 将路径数据进一步加以编辑整理后, 再连接到道路网络上。视觉导航型移动机器人一般采用第三种方法生成路径数据库。

6.4.3 安全行走

根据交通部门的统计, 人与车辆之间的事故中有 66% 发生在横穿马路的时段。对于室外导航来说, 首要的事情是既避免与车辆

发生冲突,让机器人不至于受损,又避免与儿童发生碰撞,保护儿童的安全。为了实现这个目标,取得全社会对人、车辆、机器人三者交通规则认同是很必要的。机器人必须从系统的层面健全包括人和移动体在内的环境传感数据,建立交通规则等行为规范。

1. 静止障碍物回避

一旦机器人发现了静止的障碍物,它就应该立即判断在路线上和障碍物的周围是否有回避的空间。回避空间的最小宽度应当等于机器人宽度再加上大约 10cm,这个空间随障碍物的种类、图像处理的误差、运动控制精度的不同而不同。如果有回避空间,接下去机器人应该继续进行检测,以便决定距离障碍物前几米处启动回避指令,回避的导航模式,以及在结束回避行动后,重新回到原导航模式前对障碍物所做的纵深检测。

2. 人行横道的移动

交通事故有一半是在十字路口周边发生的。因此,开发安全穿越人行横道的导航系统非常有意义。机器人穿越人行横道的行动由下列步骤组成:①在数米之前确定人行横道的位置;②在人行横道前停止下来;③检测出行者信号;④开始穿越人行横道;⑤穿越人行横道中;⑥结束穿越人行横道。越是宽阔的十字路口,绿色信号的时间越长,越便于观测,行走也就越安全。如果十字路口没有安放交通信号,则应该检测从左右两个方向接近的车辆的位置和速度,预测它们到达机器人所在点的时间后再确定机器人开始穿越行动的时间^[8]。

3. 移动体的回避

如果机器人在穿越人行横道时遭遇移动体,那么随移动体的移动方向和速度的不同,显然机器人应该采取不同的对策。假若移动体与机器人相背而行,机器人通常会保持原来的路径继续行走;假若移动体与机器人相向而行,彼此可以各贴人行道的一侧擦肩而过,或者一方暂停下来让另一方先行。有关的回避规则需要得到机器人和移动体双方的认同。为了实现移动体的回避,机器人必须借助于图像处理系统等传感器检测对方的位置和移动速度。

6.4.4 室外导航的具体事例

目前,人们已经把视觉导航型移动机器人用作视觉障碍者的向导了^[9]。图 6.26 给出了步行导引机器人的概念图,图 6.27 是它的照片。首先需要对机器人进行示教,让它记住视觉障碍者希望前往的多个目的地和到达这些目的地的路径。视觉障碍者按压把柄上的按钮传唤机器人,通过语音输入当前的地点和目的地,机器人通过合成语音回答前往目的地的路径、所需时间、十字路口数目等综合信息后开始移动。视觉障碍者手持机器人的导引把柄进行行走。机器人转弯时,位于左、右两侧的振荡器会发出信号。摄像机的作用是检测路边的石块、人行道、凸字地砖等,以此导引行走。机器人还有检测交通信号的功能,待判定情况安全后即引导主人穿越人行横道,有时也会把视觉障碍者引导至带按钮的交通信号机旁。机器人还会把招牌等路标的识别结果告知视觉障碍者,提示主人确认路径的正确性。对于自行车、垃圾袋等难以模型化的障碍物,立体摄像机具有识别位置和分类并按分类加以回避的功能。为完善步行导引机器人的故障诊断和后勤服务,需要设立专门的管理中心,该中心和步行导引机器人均连接在因特网(Web)上,一旦机器人发生故障或迷失方向就能得到及时的帮助。

森 英雄

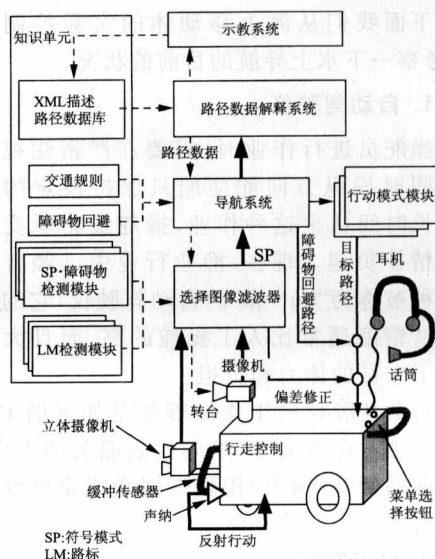


图 6.26 步行导引机器人的方框图

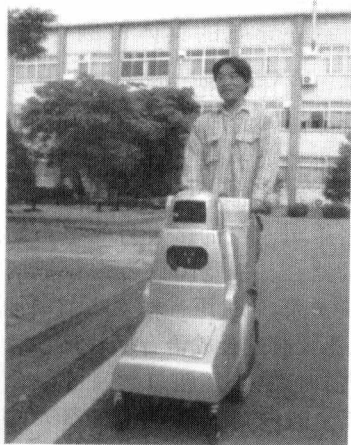


图 6.27 步行导引机器人的行走情景

6.5 水上导航

众所周知,渔船上通常配备有各种捕鱼装置,船甲板是捕鱼作业的场所。其中,有些捕鱼装置已经机器人化了,如自动钓鲢鱼装置、自动钓墨鱼装置等,它们正在取代人类从事各种作业。另外,自动航行系统也已经代替人类从事操舵作业,承担起港口到渔场、渔场之间、渔场到港口的转场的任务,大大减轻了船员的负担。从 20 世纪 20 年代自动操舵装置 (autopilot; automatic pilot) 实用化以来,有各种各样的控制系统商品面世,现在连所谓的自动航向保持装置 (heading control system) 也都普及了。

下面我们从海上移动体的实际控制出发,考察一下水上导航的目前的状况。

1. 自动驾驶仪

操舵员进行作业时,需要在严密注视罗盘的同时操纵方向舵使船只保持设定的航向。长时间从事这种作业,操舵员将承受很大的精神负担。现在,渔业行业中已经普及了一种被称为“au·pi”的自动驾驶仪,它的航向保持精度通常比人工操舵的高,而且大大减轻了船员的体力和负担。

自动驾驶仪的工作原理就是如下的 PID 控制原理。在本文中,航向代表船头的方向,而航向的偏差(偏角)用陀螺罗盘或磁性罗盘(磁性指南针)检测。

① 设定航向。

② 检测船头方向与设定航向之间的偏差

角 θ (偏角)。

③ 由式(6.12)计算和提供舵角命令 μ 。 μ_1 称为回舵(或返回舵), μ_2 称为制动舵(或压舵)。舵角 μ_3 是与系统的积分调整功能相应的角度,其作用是对潮流流引起的稳态偏差进行修正。 N 和 R 是增益调整,分别被称为舵角调整(rudder adjustment)、压舵调整(rate adjustment)。因为在货运前、后船的质量发生了变化,引起船的偏航力矩也发生了变化,并波及到舵本身的可操纵性(可驾驶性)的变化上,所以需要对 N 、 R 的增益做适当调整。

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 \\ &= - \left(N\theta + R \frac{d\theta}{dt} + I \int \theta dt \right) \end{aligned} \quad (6.12)$$

在暴风雨天,由于受到波浪等拍打的缘故,船头会左右振荡,引起所谓的船头偏航(yawing)。这时,即使不对舵面施加操作,在多数情况下船只也能自然地返回原来的航向,反之,如果强行下达舵面操作命令,反而会加剧船的横摇,损失速度,所以一般都将某个偏角范围设为死区,人为地限制对舵面进行的操作,而死区的宽度应该能够进行调整,称为天气调整。显然,既然设定了死区区域,就不可避免横摇(yawing)的存在,所以人们提出了天气调整方法,当偏角变大时将 N 的增益增大。也就是说,根据横摇的平均振幅可以自动地进行增益调整。

2. 自适应自动驾驶仪 (adaptive autopilot)

众所周知,受上述海况气象条件变化、捕获鱼量的载荷状况、水和油类等消耗量的影响,船只的吃水深度会发生变化,传统的自动驾驶仪只能通过 PID 各个增益的调整来应对这样的变化。另外,为了改变航向,还必须在自动操舵方式和手动操舵方式之间来回进行切换。自适应自动驾驶仪是 PID 的各个增益能够自动调整的一种自动驾驶仪。

船在径直前进时,如果给定一个舵角 μ 输入量,船就会进入回转运动,最终归结为以 $K\mu$ 的角速度做稳定回转。船体的运动可以用式(6.13)近似表示。式中的参数 K 、 T 被称为操纵性能指数, K 表示回转性能, T 表示操舵的跟踪性能。

$$T \frac{d\dot{\theta}}{dt} + \dot{\theta} = K\mu \quad (6.13)$$

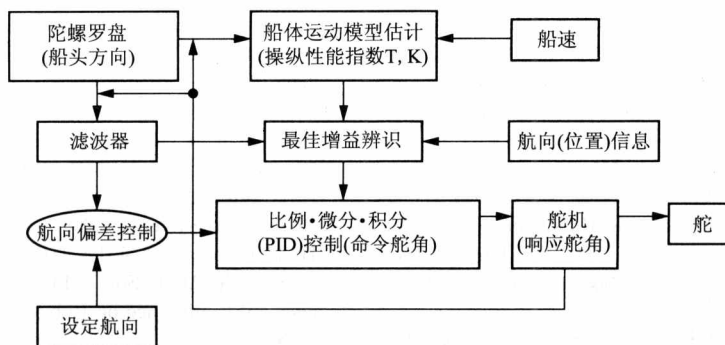


图 6.28 自适应自动驾驶仪的控制框图举例

式中, μ 为舵角; θ 为偏航角; $\dot{\theta}$ 为航向变化率; $d\theta/dt$ 为偏航角加速度。

在初始条件 $\mu=\mu_0, t=0, \theta=0$ 下求解式(6.13), 得到式(6.14)。当 $t \rightarrow \infty$ 时, 若设此时的偏航角速度为定值 ω_0 , 由于 $e^{-t/T} \rightarrow 0$, 故有式(6.15)成立。

$$\theta = K\mu_0(1 - e^{-t/T}) \quad (6.14)$$

$$\omega_0 = K\mu_0 \quad (6.15)$$

由于随着海况气象条件的变化, 舵的可操纵性也会发生改变, 因此还必须考虑操纵性能指数的数值变化。自适应自动驾驶仪的优点在于它能采集舵角和航向变化率的变化, 把操纵运动方程式中的各个参数视为变数, 根据实际运动决定(辨识)相应的参数, 再根据结果, 对反复设定的各个增益的最佳数值施加控制。由于参数受到船速的影响, 所以实际上船速也受到控制。另外, 船的形状也是影响操纵性能的主要因素, 所以船体的主要项目, 如长度、宽度、排水量等也都作为数据被给定。为了进行数值识别, 人们推荐了不同的方法, 如概率模型方法、卡尔曼滤波器方法等。

如果把航向作为自动操舵控制的唯一目的, 那么由于操舵次数和舵角量增加, 引起操舵时因船体阻力会导致船速下降、总航程(航行距离)延长、燃料消耗量增加等后果。在保持航向为主要目的这一点上, 自适应自动驾驶仪与传统自动驾驶仪别无二致, 不过它又增添了节能机制, 因而还体现出节能效果。一般在求算评价函数 J 的数学模型中, 以 J 最小为目标决定各个参数。市场销售的自适应自动驾驶仪产品具有三种可选运行模式, 即

经济性(节能性)优先模式、航向保持性优先模式, 以及折中模式。图 6.28 给出控制框图的一个例子。

3. 自动航行系统

自动航行系统是一种自动保持船体设定航向, 遇到变向点(改变航向地点)能够进行自动操舵, 而进入新航向航行, 并在预定地点自动停泊的系统。一般它通过 GPS 采集位置信息用作船位反馈信号, 它目前正在向更高精度的 differential GPS 过渡。它的航向保持功能除了能够保持航向外, 还有其他一些功能, 如在与航位信息进行比较之后进行操舵, 以便实施以节能为目的的航向偏差死区控制等。

近年来, 驾驶台设备有了长足的进步, 已经不限于航向、航路保持等自动操舵控制, 而被改进成一种高功能的集成桥控系统(IFS: Integrated Bridge System), 它集成了自动冲撞预防救援装置(ARPA: Automatic Radar Plotting Aid)、电子海图显示系统(ECDIS: Electronic Chart Display and Information System)等, 它的监控功能、冲撞回避功能、船位定位功能等均可以协助传统的人工从事的作业, 在减轻船员劳动、安全航行等方面做出贡献。

武田诚一

参考文献

6.1 自身位置的识别

- [1] 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一: 移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニング・システム, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8 (1997) pp.1180-1187

- [2] 小森谷清, 大山英明: 光ファイバージャイロを利用した移動ロボットの位置推定の一手法, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.532-537
 - [3] 青野俊宏, 藤井健二郎, 初本慎太郎, 神谷敏之: 起伏地における移動機の位置計測, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5 (1998) pp.728-733
 - [4] Shintaro Uchida, Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta: Position Correction Using Elevation Map for Mobile Robot on Rough Terrain, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1998) pp.582-587
 - [5] 小森谷清, 大山英明, 谷和男: 移動ロボットのためのランドマーク観測計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4 (1993) pp.533-540
 - [6] 橋本雅文, 大場史憲, 藤川泰司, 今牧和敏, 西田哲生: レーザ位置計測とデッドレコニングの統合による車輪型移動ロボットの位置推定法, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7 (1993) pp.1028-1038
 - [7] 美馬一博, 金森哉吏, 梶谷誠, 明愛国: 偏光フィルムを用いた移動ロボット用ランドマークシステムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.4 (1998) pp.518-526
 - [8] 春日智恵: デジタル標識パターンを用いた自己位置同定法, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.6 (1994) pp.857-862
 - [9] 斉丙辰, 大川義邦: 移動ロボットの誘導のための立体標識, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.2 (1991) pp.129-136
 - [10] 太田順, 山本正和, 池田和生, 相山泰道, 新井民夫: 記憶機能付き画像マークによる作業移動ロボットのための環境整備, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5 (1999) pp.670-676
 - [11] 土屋淳, 辻宏道: 新・GPS測量の基礎, 日本測量協会 (2002)
 - [12] 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一: 移動ロボットのための遞及的現在位置推定法—処理時間を要する外界センサデータの利用—, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7 (1997) pp.1075-1081
 - [13] 有本卓: カルマン・フィルタ, 第3章, 産業図書 (1977)
 - [14] 片山徹: 新版応用カルマンフィルタ, 第5章, 朝倉書店 (2000)
 - [15] 登内洋次郎, 坪内孝司, 有本卓: 移動ロボットにおける空間有限性を考慮した位置推定—内界センサ情報と作業領域に関する知識のベイズ的融合法—, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5 (1994) pp.695-699
 - [16] 広瀬茂男, 倉爪亮, 長田茂美: 群ロボットによる協調ポジショニング法, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6 (1995) pp.838-845
 - [17] Arthur C. Sanderson: Cooperative Navigation among Multiple Mobile Robots, Distributed Autonomous Robotic System 2, Springer (1996) pp.389-400
 - [18] 飯田重喜, 坪内孝司, 油田信一: 移動ロボットのカラー画像による自己位置同定法, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6 (1990) pp.641-651
 - [19] Jens-Steffen Gutmann, Wolfram Burgard, Dieter Fox and Kurt Konolige: An Experimental Comparison of Localization Methods, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1998) pp.736-743
- ## 6.2 自主移動環境模型
- [1] T. Tsubouchi: Nowadays Trends in Map Generation for Mobile Robots, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1996) pp.828-833
 - [2] H. Moravec and A. Elfes: High-Resolution Maps from Wide-Angle Sonar, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (1985)
 - [3] 飯島純一, 河崎宣史, 油田信一: 自律移動ロボットによる屋内未知環境の地図生成, 第6回知能移動ロボットシンポジウム (1992) pp.93-98
 - [4] 蒲生孝司, 大矢晃久, 油田信一: 自律移動ロボットのための環境地図作成ツール, 第1回ロボティクスシンポジウム予稿集 (1996) pp.129-134
 - [5] J. J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte: Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot, Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991) pp.1442-1447
 - [6] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox: A Probabilistic Approach to Concurrent Mapping and Localization for Mobile Robots, Machine Learning and Autonomous Robots (joint issue), Kluwer Academic Publishers, Boston (1998) pp.1-25
 - [7] F. Launay, A. Ohya and S. Yuta: A Corridors Lights based Navigation System including Path Definition using a Topologically Corrected Map for Indoor Mobile Robots, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (2002) pp.3918-3923
- ## 6.3 室内导航
- [1] 太田順, 倉林大輔, 新井民夫: 知能ロボット入門—動作計画問題の解法—, コロナ社 (2001) pp.11-87
 - [2] O. Khatib: Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1 (1986) pp.90-98
 - [3] A. Elfes: Sonar-based real-world mapping and navigation, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.3, No.3 (1987) pp.249-265
 - [4] Alexander Zelinsky: A mobile robot exploration algorithm, IEEE Transactions of Robotics and Automation, Vol.8, No.6 (1992) pp.707-717
 - [5] 登尾啓史, 浪花智英, 有本卓: クワッドツリーを利用した移動ロボットの高速経路生成アルゴリズム, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.5 (1989) pp.3-13
 - [6] V. J. Lumelsky and A. Stepanov: Path planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape, Algorithmica, Vol.2 (1987) pp.403-430
 - [7] H. Choset and K. Nagatani: Topological simultaneous localization and mapping (SLAM): toward exact localization without explicit locali-

- zation, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.17, No.2 (2001) pp.125-137
- [8] 永谷圭司, 油田信一: 衝突の危険性を評価関数とする移動ロボットの経路とセンシング点の計画, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2 (1997) pp.197-206
- [9] J. Reeds and L. Shepp: Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards, Pacific Journal of Mathematics Vol.145, No.2 (1990) pp. 367-393
- [10] J. C. Latombe: Robot Motion Planning, Kluwer (1991)
- [11] 坪内孝司・浪花智英・有本卓: 平面を移動する複数の移動障害物とその速度を考慮した移動ロボットのプランニングとナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.7 (1994) pp.111-119
- [12] 下笹洋一: 警備ロボットを用いた警備システム, 電子画像学会誌, Vol.30, No.2 (2001) pp.155-160
- #### 6.4 室外導航
- [1] 青木正喜: ITSにおける画像計測と画像処理, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3 (1999) pp.321-327
- [2] 森英雄: 動物行動学から何を学ぶか, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.490-495
- [3] 安富敏ほか: 歩行のリズムに基づく歩行者検出の一手法, 電子通信学会誌, Vol.J 78-D-II, No.4 (1995) pp.608-617
- [4] H. Mori et al.: ON-line vehicle and pedestrian detection based on sign pattern, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.41, No.4 (1994) pp. 384-391
- [5] 劉詠梅ほか: シーン内の文字領域の抽出について, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J 81-D-II, No.4 (1998) pp.641-650
- [6] 西村茂樹他: ナビゲーションシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3 (1999) pp.339-344
- [7] 中村雄一ほか: 歩行ガイドロボットの走行環境のテイーミング, 日本機械学会 [No.00-2] ROBOMECH 00 講演会論文集 (2000) 2 P 1-65-114
- [8] S. Kotani et al.: Danger estimation of the Robotic Travel Aid (RoTA) at intersection, Robotics and Autonomous Systems, Vol.18 (1996) pp.235-242
- [9] 森英雄ほか: 歩行ガイドロボット実用化のための研究開発, 日本ロボット学会誌, Vol.19 No.8 (2001) pp.946-941
- #### 6.5 水上導航
- [1] 柿原利治ほか: 東京水産大学神鷹丸電子航法総合装置, 日本航海学会誌, No.86 (1985) pp.43-48
- [2] 西谷芳雄: コンパスと自動操舵, 成山堂書店 (1988)
- [3] 桑田守: アダプティブオートパイロット, 日本造船学会誌, Vol.724 (1989) pp.15-23
- [4] 谷口忠: 高度機能統合型ブリッジシステム, 日本造船学会誌, Vol.822 (1997) pp.10-14
- [5] 小原裕喜: オートパイロット, 関西造船協会誌「らん」, No.53 (2001) pp.5-10
- [6] 前畑幸弥: ジャイロコンパスとオートパイロット, 成山堂書店 (1993)

第 5 篇 系统技术

第 1 章 机器人系统

1.1 机器人系统的构成

1.1.1 机器人系统的构成

1. 机器人的分类

按产品进入市场的时间顺序进行分类, 机器人可以分为: 1960 年进入市场的工业机器人(图 1.1~图 1.3), 1990 年进入市场的空间机器人和医疗机器人(图 1.4、图 1.5)等, 以及自 2000 年以来开始在市场上亮相的智能机器人。

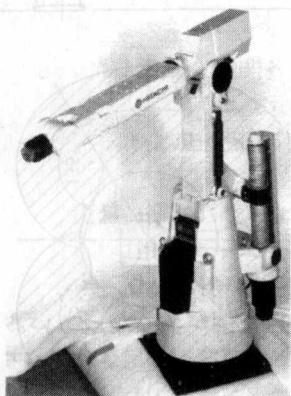


图 1.1 垂直多关节机器人

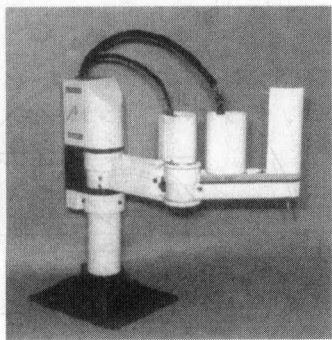


图 1.2 水平多关节机器人

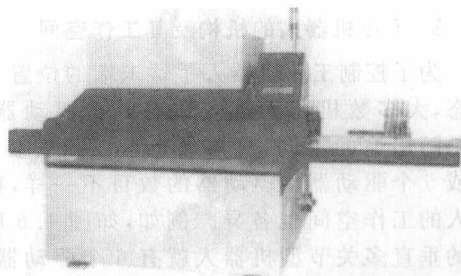


图 1.3 插件机



图 1.4 空间机械手实验样机

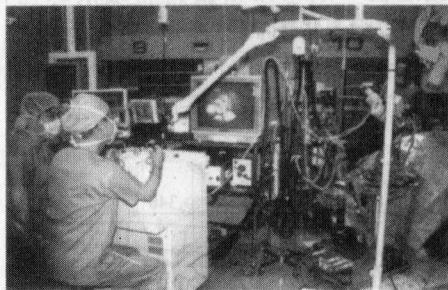


图 1.5 辅助脑肿瘤手术的机器人

2. 工业机器人的分类和它的构成

工业机器人曾一度主要分为极坐标型、圆柱坐标型两类。极坐标型机器人以 Unimate 为代表, 圆柱坐标型机器人以 Versatran 为代表。其中, 极坐标型工业机器人主要在

汽车工业的点焊作业中得到大量应用,由此树立起工业机器人的形象。随着人们对机器人性能的要求不断提高,为了使机器人完成复杂和高精度的作业,又相继出现了可以在垂直方向和水平方向移动的多关节型机器人(图1.1、图1.2)。此外还有一种被称为插件机的直角坐标型机器人,它主要用于印刷电路板上各种电子元器件的装配(图1.3)。

3. 工业机器人的机构及其工作空间

为了控制工业机器人手臂末端的位置与姿态,大多数机器人都安装有6个驱动器。但是随用途的不同,机器人也可以只安装4个或5个驱动器。驱动器的数目不一样,机器人的工作空间也各异。例如,如图1.6所示的垂直多关节型机器人就有6个驱动器,图1.7所示的水平多关节型机器人有4个驱动器。图1.1和图1.6中的垂直多关节型机器人多数采用连杆机构驱动机器人的各个关节。不过,最近不采用连杆机构驱动各个关节的机器人日渐增多,如图1.8所示,其目的在于扩大机器人的工作空间。

在工业机器人的发展初期,驱动器一般借助于油缸或液压马达,后来大多改用直流伺服电机,而近年来选择交流伺服电机驱动的机器人逐渐变得多了起来。在机器人系统中,直流或交流伺服电机都需要与减速器连接,减速器一般采用谐波齿轮或滚珠丝杠。最近出现了一些不需要减速器,以直接驱动电机(direct drive motor)作为驱动器的机器人,不过这种驱动方式尚不普及。

为了能驱动工业机器人的各个驱动器,系统中还需要配备功率放大器、驱动装置和交直流逆变器等设备。

4. 非工业机器人的机构

空间机器人、医疗机器人等也称为操纵型机器人,它们由主操作手和从属操作手组成。此外,娱乐机器人大多数配备有移动机构。不过,下面将要讲述的机器人的硬件与软件几乎具备同样的功能与构成。

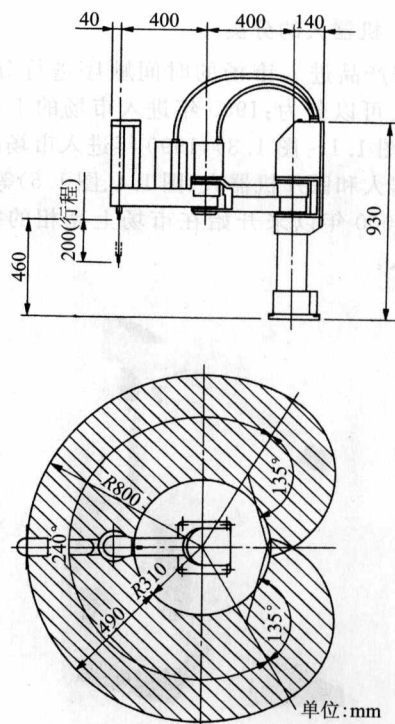


图1.7 水平多关节机器人及工作空间

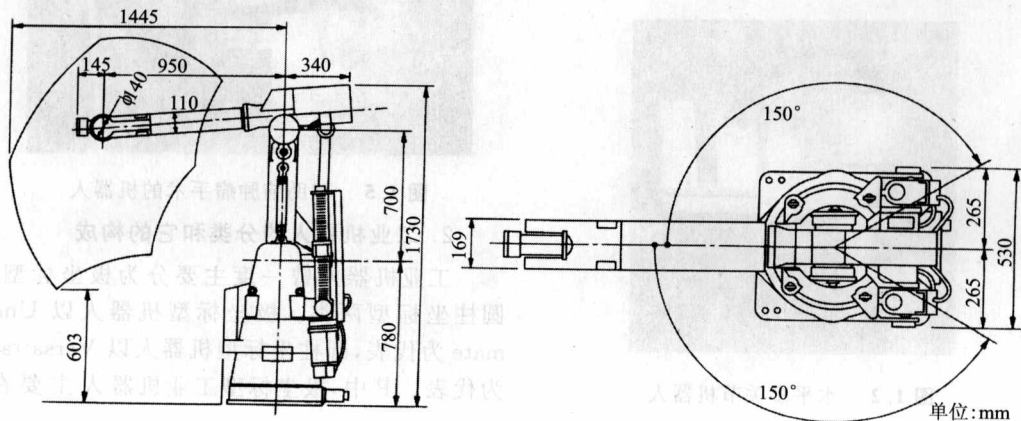


图1.6 垂直多关节机器人及其工作空间

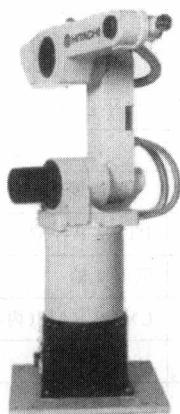
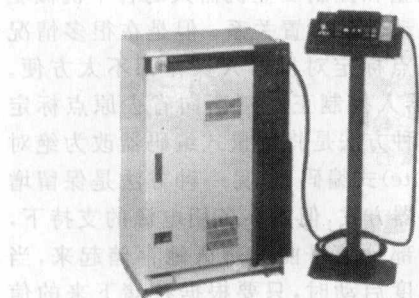


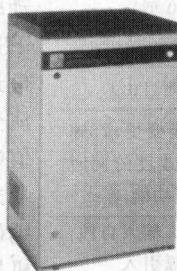
图 1.8 无连杆机构扩大运动范围的机器人

5. 周边装置

要想使机器人完成各种各样的运动,机器人至少应该具有控制装置(包括上述的功率放大器、驱动装置、逆变器等)、运动示教用的可编程单元(示教装置)和再现示教动作的示教再现装置(play back unit)(图1.9)。目前,工业机器人主要用于焊接作业,与机器人协调作业的电焊机也是主要的周边装置。



(a) 控制装置和示教再现控制的标准周边装置



(b) 控制装置和可编程单元

图 1.9 机器人的周边装置

周边装置还包括各种传感器,例如,用于反馈控制的焊接位置检测传感器、实现更高级作业的视觉传感器、完成除焊接外的其他作业的视觉传感器和力传感器等。此外,装配作业中的零部件传送装置也属于工业机器人的重要周边装置。

只有将机器人安排在适当的安装位置,它才能发挥更有效的功能,这是柔性自动化FA的一部分。这时,主计算机、打印机和磁盘驱动器等也被看成是机器人的主要周边装置(图1.10)。

1.1.2 机器人的软件构成

机器人的软件大致分成三种:①伺服控制级软件(用于驱动器的驱动控制);②运动控制级软件(用于路径控制、插补和坐标变换);③周边装置控制级软件。以图1.1和图1.2所示的垂直与水平多关节机器人为例,这些软件控制的内容列于表1.1和表1.2中。详细的介绍将在1.2节中进行阐述。

表1.1中有机器人语言(HRL),以往各

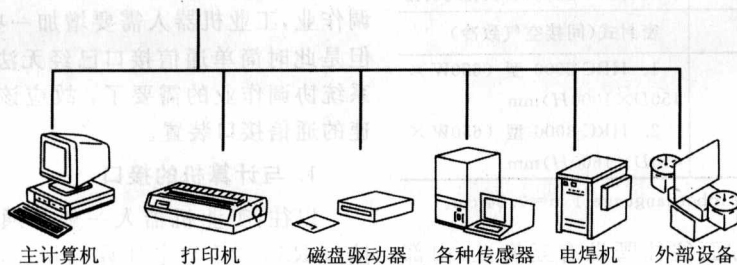


图 1.10 FA 中的计算机与接口

表 1.1 垂直多关节机器人

项 目		性能规格
机器人总体	示教方式	远程示教和机器人语言(HRL)两级示教
	控制轴数	同时最多控制 12 轴(机器人本体 6 轴+任选辅助轴最多为 6 轴)
	位置速度控制方式	全数字软件伺服控制
	存储器容量(点数,步数)	标准(2000, 2000) 用户任选(6000, 6000 或 10 000, 10 000)
	外部存储器	用户自选 3.5in 软磁盘
	显示器	液晶(40 字×8 行),汉字、平假名、片假名显示
外部控制信号	固有(专用)	输入 1. 外部程序选择(4 点/15 种);2. 异常停机;3. 启动;4. 运行预选(4 种外部程序选择与兼用) 总计:16 点
		输出 1. 外部程序选择标志(4 点/15 种);2. 异常停机中;3. 故障发生;4. 原始位置 总计:16 点
	通用(外部同步)	输入 16 点,用户任选(最多 256 点,仅限 HRC-3000 型)
		输出 16 点,用户任选(最多 256 点,仅限 HRC-3000 型)
	串行输入输出	2 通道用户任选
自动运行	脱离可编程装置运行	可以(连接与脱离自由)
	运行速度的更改	1. 焊接条件在线变更;2. 速度覆盖功能(运行速度的同时更改);3. 自动减速功能
	运转条件设定	1. 机器人自锁;2. 输入自锁;3. 输出自锁;4. 电弧引入
	暂停条件设定	1. 示教点;2. 步数;3. 指定步数;4. 程序;5. 其他
	运行预选	可
电 源		三相交流 200V/220V (+10%, -15%), 50Hz/60Hz
构 造		密封式(间接空气致冷)
外形尺寸		1. HRC-2000 型(650W×450D×1000H)mm 2. HRC-3000 型(650W×450D×1600H)mm

注: HRL: Hitachi robot language; 1 in=2.54 cm.

个公司在软件方面往往既没有互换性,内部结构也不透明。不过,现在开放软件结构的做法已经普及,这样就给用户带来很多方便,

能灵活地利用各种传感器信息和已有的软件。

表 1.2 水平多关节机器人

项 目		性能规格
示教方式		示教再现
控制方式		PTP、CP 控制
控制轴数		同时 4 轴
储存方式		CMOS RAM(内有备用电源)
存储容量	位置	1000 点
	顺序	2000 步
外部存储装置		IC 存储卡(用户自选)
外部输入输出点数		输入 24 点、输出 24 点,用户自选,分别可以扩大到 48 点
串行接口		RS-232C, 2 通道
插补功能		三维直线插补、圆弧插补

1.1.3 机器人系统的标定

工业机器人在作业前需要对其每个驱动轴进行原点标定(initiate)。原点标定是调整增量式编码器信号的一种操作。增量式编码器用于测量和控制工业机器人的各个机械驱动轴与从动轴的位置关系。但是在很多情况下这种原点标定对机器人操作都不太方便。最近,机器人控制正在逐渐向省去原点标定演变。一种方法是将增量式编码器改为绝对值(absolute)式编码器;另一种方法是保留增量式编码器方式,但是在备用电源的支持下,编码器的部分信号能够长久地存储起来,当机器人再度启动时,只要根据存储下来的信号,稍微做一点运动进行适当的校正即可。

1.1.4 机器人系统的通信接口

正如在 1.1.1 节 5. 中所述,为了实施协调作业,工业机器人需要增加一些周边装置。但是此时简单通信接口已经无法满足机器人系统协调作业的需要了,故应该改用各种高速的通信接口装置。

1. 与计算机的接口

以往,工业机器人一般都通过串行通信接口 RS-232C 与主计算机相连,但近年来有的已经改用并行接口(parallel interface),甚至一部分机器人已经开始采用总线(bus)连

接。工业机器人最近开始流行与网络相连接,因此与网络的通信显得极为重要,于是使用Java的系统也开始得到普及,其结果是导致开放式机器人系统的推广。

2. 与各种传感器的接口

开关继电器接口一直是工业机器人最常用的方式。近年来,与上述计算机接口一样,工业机器人采用了各种传感器接口,从串行接口RS-232C到并行的AI/O和DI/O接口,有的甚至采用了总线接口。

藤江正克

1.2 作业示教方法

在机器人进行作业前,必须对机器人发出命令,规定它应该执行的动作和作业的内容。这个过程被称为对机器人的示教(teaching)或编程(programming)。示教的内容通常存储在机器人的控制装置内,通过再现(playback)就能实现机器人的动作和完成机器人的作业。

下面整理归纳了机器人的各种作业示教方法,在对其进行分类并加以说明的同时,就作业示教方法与运动控制方式的关系、示教内容加工整理和编辑的方法等做概要介绍。

1.2.1 作业示教法的分类

按机器人完成动作和进行作业所需要的信息来进行分类,机器人的作业示教方法大

致可以分成三大类:①位置与姿态信息,即描述机器人的动作路径和定位点的信息;②顺序信息,即机器人的动作顺序信息和机器人与周边装置的同步关系;③动作和作业条件信息,即有关机器人动作的速度、加速度以及作业条件(例如,焊接作业时焊接电流、电压等)信息。下面将对它们分别进行具体的阐述。

1. 位置/姿态信息示教法

机器人运动路径的位置/姿态信息示教方法可以归纳为如图1.11所示。它大致可以分为操作实际机器人作业的示教方法和不操作实际机器人作业的示教方法。在实际操作机器人时,根据机器人运动的方式,确定机器人运动路径位置的示教方法又可以再细分为下述四种。

1) 直接示教(direct teach)法

直接示教法就是由示教者直接移动机器人的手臂,使机器人沿着预先规定的路径运动的一种示教方法。直接移动机器人手臂的方式有两种:一种是让机器人手臂处于自由状态,用人力直接移动机器人的直接移动方式;另一种是由示教者操作安装在机器人手部上的操作装置,间接驱动机器人手臂的间接移动方式。

让机器人手臂处于自由状态,靠人力直接移动机器人的方式,主要是对喷漆机器人(液压方式驱动)进行示教,或者对小型装配

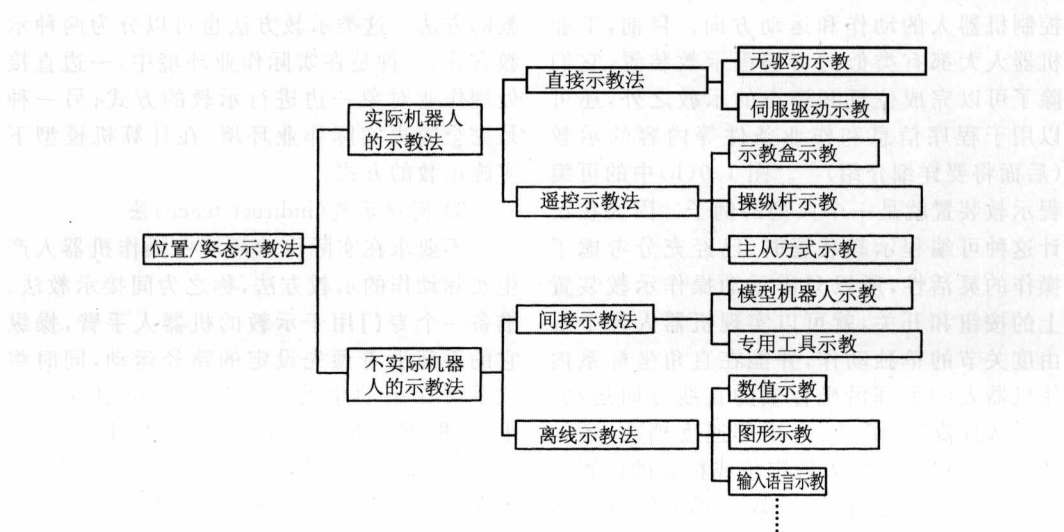


图 1.11 位置/姿态信息示教法的分类

机器人进行示教^[1]。采用这种示教方式示教时,或者通过操作离合器将手臂与各个驱动器脱离,或者把液压驱动器的主油路切换到回油管路上。为方便人力移动机器人的手臂,还给机器人精心设计了补偿手臂重力力矩的平衡弹簧机构、配重机构等。

在操作控制装置移动机器人手臂的示教方法中,即使手臂与各个驱动器不脱离,操作伺服系统就能获得与移动自由状态的机器人同样的示教效果。在这种示教方式中,控制装置通过力传感器,以力控制的方式实现移动机器人手臂的直接示教^[2]。

实现机器人运动路径控制的示教方法有两种:一种是只对运动路径上的一些代表点实施示教(后面将有详细叙述),代表点之间的路径通过插补方式实现控制;另一种是对运动路径上的点逐一进行示教,然后通过再现操作来实现控制。直接示教法通过直接移动机器人手臂示教的方法,即由示教者直接移动机器人的手臂,逐一对运动路径上的所有点完成示教,然后让机器人再现人的示教动作。

2) 遥控示教(remote teach)法

如果机器人本体远离示教场地,那么可以选择遥控示教法,即不直接接触机器人手臂就能对机器人完成示教。在这种示教方法中,使用一种被称为示教盒的可编程示教装置,示教者操作示教盒上的按钮开关,就可以控制机器人的动作和运动方向。目前,工业机器人大多有类似的可编程示教装置,它们除了可以完成位置和姿态的示教之外,还可以用于程序信息和作业条件等内容的示教(后面将要详细介绍)^[3]。图1.9(b)中的可编程示教装置就是一个典型的例子。因为在设计这种可编程示教装置时,已经充分考虑了操作的灵活性,所以只需手动操作示教装置上的按钮和开关,就可以实现机器人各个自由度关节的单独动作,并能在直角坐标系内使机器人的手部沿坐标轴的直线方向运动。通过选择高速、低速、点动等速度档次,还能够实现对机器人的大致定位或精确的位置微调等操作。总之,使用示教装置上的这些按钮开关足以远距离引导机器人完成预定的动作,对运动路径上的代表点进行逐个的定位示教,并可以借助于示教按钮的命令,将机器

人的位置和姿态信息存储下来。

有些机器人用操作杆(joy stick)代替操作按钮,使操作更加容易和方便。在操作杆方式中,用电位计检测操作杆的位置变化,但这不一定对三维位移命令适用。如果用直接示教法中的力传感器替代电位计来检测位移,操作杆方式应该更有发展前途。

这类方法操纵机器人,仅适用于对运动路径上的某些代表点进行示教,至于对代表点之间的控制,则需要靠插补计算来完成。这是因为采用这种方法时,让机器人沿着复杂的作业运动路径连续移动示教会十分麻烦。

另外,可以考虑用主从操作机代替可编程按钮和操纵杆进行示教。这种主从操作机技术也是遥控示教法中的一种^[4]。在主从操作机示教法中,主操作机用于示教,实际作业机器人作为从操作机。示教者操纵主操作机,使从操作机(机器人)跟随运动。此时,不要求主操作机与机器人具有相同的构造,只要机器人手部的运动与主操作机的示教运动一致,就可以认为示教是成功的。无论是对路径进行逐点示教,还是对路径上的代表点进行示教,这种方法都是很有有效的。不过从经济的角度看,如果仅仅为了示教就增加一个主操作机,可能不大合算。因此,除了某些特殊情况外,一般不宜采用这种方式。

还有一类不实际操纵机器人就能进行示教的方法。这类示教方法也可以分为两种示教方式:一种是在实际作业环境中,一边直接处理作业对象一边进行示教的方式;另一种是完全脱离实际作业环境,在计算机模型下实施示教的方式。

3) 间接示教(indirect teach)法

不要求在实际作业环境中操作机器人产生实际动作的示教方法,称之为间接示教法。准备一个专门用于示教的机器人手臂,操纵它的手部沿着预先设定的路径运动,同时将该手臂在运动中的位置和姿态信息存储起来,再根据记忆的数据对机器人进行示教。这种示教方法依据的是一个所谓的模型机器人,与直接示教方法一样,由示教者直接操纵模型机器人手臂进行示教。模型机器人与实际作业的机器人不一样,不必安装驱动器之类的驱动装置,因此比较容易解决机器人手

臂的轻巧性和重力平衡等问题。与通常的直接示教方法相比,该方法在操作上十分方便。不过,它必须搞清楚实际作业机器人和模型机器人与各自作业对象之间的相对位置关系,还必须正确把握作业机器人和模型机器人的形状、尺寸等几何参数,并对示教数据进行适当补偿或修正。这些问题属于共同问题,对下述不采用机器人实施示教的示教方法来说具有普遍性。

如果进一步扩展以上示教方法,可以演变成不用模型机器人,而借助于类似于光笔的操纵杆或示教盒,根据电视摄像机或超声波传感器等监视设备从作业环境获得的位置和姿态信息,对机器人进行示教^[5]。但是,由于存在示教数据精度以及很多必须解决的其他问题,所以目前它还处在研究阶段。

4) 离线示教(off-line teach)法

不使用实际作业机器人,脱离实际作业环境生成示教数据的方法称为离线示教法或离线编程示教法。早期的离线示教法属于数值输入法。它把位置和姿态信息作为示教数据直接输入给机器人。但是要将运动路径上所有点的数据都输入给机器人显然是十分困难的。这种方法一般多用于码垛机器人的作业。因为此时机器人位置和姿态的变化都很有规律,数值输入法能起到示教相对移位量的辅助作用。

所生成的示教数据不以运动路径的顺序数据序列直接输入机器人,而是在计算机上建立机器人作业环境的模型,在此模型的基础上再生成示教数据,这是一种智能化的示教方法。机器人的作业环境模型则由作业对象的形状模型、固定作业对象的工作台等与机器人安装位置相关的几何模型构成。示教机器人运动路径时,运用计算机图形方法,将模型转换成示教者容易懂的可视化图形,然后用光笔、鼠标等指示画面上对应的位置,再用机器人语言或命令的方式规定机器人的动作^[6]。

有关机器人语言的情况将在第5篇第4章进行详细介绍。这里需要指出的是高级机器人语言对作业环境模型的输入功能来说是必不可少的。从广义的角度看,作业环境模型的输入本身也应该视为一种示教。近年来,由于使用计算机辅助设计(CAD: Comput-

er Aided Design)对作业对象进行设计逐渐普及,因此现在有人正在尝试直接采用CAD数据生成机器人作业环境模型的方法^[7]。

在多数情况下,离线示教法除了解机器人的作业环境模型之外,也同时包含下面介绍的示教顺序的信息。由于是用机器人语言来描述机器人的动作,所以使用“编程”这个词比使用“示教”更为确切,故离线示教法也可以称为离线编程(off-line programming)法。

在离线示教法(或离线编程法)中,不必实际驱动机器人,使用计算机内部存储的模型就能够对被示教的机器人实行动作仿真,并通过仿真确认示教的内容是否恰当。这个特点是其他示教方法所不具备的。不过应该指出,实际作业环境与计算机模型之间不可避免地存在差异,例如,每个作业对象个体之间就存在着所谓的个体差异。因此,必须采用传感器进行补偿才能构成更完善的示教系统^[8]。

用所谓零件装配图的形式向机器人输入作业目标是机器人智能化研究的一部分。这时,根据输入的作业目标,机器人可以自动判断、规划零件装配的顺序,自动生成完成该作业目标的动作内容。目前,这样的工作还处在研究阶段^[9]。在该例子中,作业的目标就是用装配图的形式表达零部件之间的位置关系,故给出了装配图就等同于完成了示教,因此可以说它也是一种离线示教法。

图1.12分别表示出典型的直接示教法、遥控示教法、间接示教法和离线示教法的图形示意。

2. 顺序信息示教法

通过示教使机器人获得位置和姿态的信息后,还需要解决机器人运动的顺序和它与周边装置同步工作的问题。对此,下面将介绍与机器人动作实施顺序有关的顺序示教方式。

1) 固定方式

如果机器人采用固定控制方式,那么在顺序地完成位置、姿态的示教后,动作的顺序就决定了,即此时顺序信息是无法独立示教的,它是在位置、姿态示教和存储的过程中,按照记忆的顺序一并按间接给定的。例如,在这种示教方式下,如果出现同一点需要多次

重复定位,那么每次都必须反复示教该位置和姿态的信息,显然,这样一来,示教作业就显得十分繁琐。



图 1.12 各种位置与姿态示教法的图形示意

此外,在这种方式下,有关自动传送装置的启停命令、限位开关信号的输入等待、机器人与周边装置彼此的输入输出,以及它们之间的同步控制等信息的示教,都必须与位置姿态示教同时进行。不仅如此,通常还要把这些顺序信息当作示教点的属性加以处理(即当作示教位置、姿态的附加信息进行存储和处理)。

2) 可变方式

可变顺序示教方式不依赖于位置和姿态的示教顺序,而是依据机器人的动作实施顺序来进行示教。如图 1.13 所示的例子,要求末端位于 P_1 点的机器人手臂将置于 P_2 点的物品移放到 P_3 点。 P_{20} 点和 P_{30} 点分别为与 P_2 点和 P_3 点对应的临近点,也称为避让点。机器人动作所通过的点依次为 $P_1 \rightarrow P_{20} \rightarrow P_2 \rightarrow P_{20} \rightarrow P_{30} \rightarrow P_3 \rightarrow P_{30} \rightarrow P_1$,如果用固定示教方式对机器人顺序进行示教的话,则必须依次对这 8 个点进行顺序示教。如果改成可变示教方式进行示教,那么只需要对 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_{20} 、

P_{30} 这 5 个点进行示教,然后再单独把这些示教点按照运动顺序指定和示教一遍即可,因此简化了机器人位置和姿态示教的过程。顺序信息的示教一般都采用机器人语言^[10]。

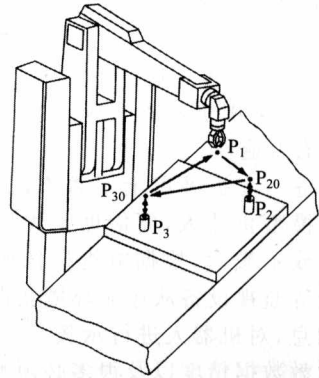


图 1.13 机器人的运动路径

有关机器人语言的详细介绍将第 5 篇第 4 章中予以说明。现以机器人语言的顺序信息示教为例,设想一种最底层的面向动作级的机器人语言。如果用命令 $MOVE P_i$ 表示机器人向 P_i 点移动的动作,那么就可以使用一组 $MOVE$ 命令来描述机器人的一系列动作顺序,从而完成对机器人动作顺序的示教。

可变速教方式把位置、姿态的示教与动作顺序的示教完全分开,彼此独立地进行,这种方式最适合多次重复通过同一点的动作示教,如搬运作业和装配作业等;否则,如果仍然采用过细的动作顺序示教方式,就显得十分繁琐。于是又出现了一种更好的方式,就是在示教位置、姿态的同时,自动生成与上述 $MOVE$ 命令相当的命令,必要时用它同时进行顺序信息的示教,定义返回已示教点的运动。

在焊接机器人中,如果需要通过多个示教点的形式描述同一条路径,此时可以借助于固定顺序示教方式产生一个示教点群(block),把它们看作一个单元,即用简单的语言形式顺序示教每一个点群的动作顺序。现在这种示教方式已经商品化了^[11]。

在用可变顺序示教方式对机器人和周边装置的同步控制进行示教时,要将上述 $MOVE$ 命令与同级的输入、输出命令打包,一起进行描述和使用。

3. 运动条件与作业条件示教法

按照示教的顺序,让机器人通过示教点

(位置和姿态)的时候,还应该示教动作的条件,以及机器人实施作业的条件(例如,使用的工具等)。下面介绍这方面的示教方法。

除了运动速度、加(减)速度(还有加减速的时间)等数值条件之外,关于机器人的主要运动条件还可以举出指定速度控制模式的加减速方式(梯形速度控制、S形速度控制等)、定位方式选择(指示机器人在示教点定位后有等待处理的信号)等。在插补控制的机器人中,指定插补方式(直线插补、圆弧插补等)也是运动条件之一。

根据机器人实施的作业不同,作业条件的内容也不一样。以弧焊作业为例,除焊接电流、焊接电压等作业条件外,还需要指定所谓的“weaving”动作(交叉焊接动作)等作业条件。又如,在研磨作业中,研磨机的转速、对工件的压力等也是作业条件。这些作业条件虽然与机器人本身的动作没有直接关系,但机器人进行作业时还是必须对这些条件加以示教。

从形态上划分,运动条件与作业条件示教法有以下两种分类方式:

1) 附属于示教点的示教方式

对每一个示教点实施示教时,同时也对运动条件和作业条件进行示教,这种示教方式称为附属于示教点的示教方式。这种方式与顺序示教小节里固定示教法中的同步控制信息示教方式的内容基本相同。因此,在这种场合一般是把运动条件和作业条件当作示教点或相关示教区域的属性来处理的。在运动条件和作业条件中,有时要给出速度等数值参数,如果对各示教点均进行示教和输入,就太繁琐了。为了方便起见,还有一种示教方式,它将一组条件打包,并加上序号,示教时仅调用该组的条件序号即可^[3]。

2) 独立于示教点的示教方式

这种方式与可变顺序信息示教法一样,是一种独立于运动条件和作业条件的示教方式。因此,它大多使用机器人语言或与之相当的语言,以命令的形式进行示教。例如,用 SPEED100(设单位为 mm/s)的形式指定机器人的运动速度,在下一条速度命令输入之前,这条命令将一直有效。在这种场合,也可以根据作业内容将条件打包,附加序号,在进行示教时同样地只需调用序号就行了。

还有一种示教方式尚处于研究阶段。它能离线地对每一个作业内容自动生成作业条件,并以此代替示教信息。具有代表性的成果是基于专家系统理念做成的焊接条件自动设定系统^[12]。在使用时,只要向该系统输入焊缝形状、工件厚度等数据,就能自动推算出焊接的电流、电压、焊接速度等。因此,不熟悉作业工艺规范的用户也能很好地操作机器人系统,提高了自动化水平,因此受到用户的欢迎。

此外,人们还在开展统一示教的研究,示教的对象有机器人及其周边装置的动作信息、顺序信息、作业条件等。将机器人语言命令与 SFC(Sequential Function Chart, 顺序功能流程图)的概念结合起来的人机接口(human interface)研究就是这种尝试性研究之一^[13]。

1.2.2 示教信息的使用方法

前面介绍了机器人示教的各种方法,借助于这些示教方法,机器人可以获得诸多信息,下面我们来介绍如何利用这些示教信息对机器人实施控制。首先介绍各种基于示教信息的机器人运动控制方式,然后介绍对示教信息进行校正和编辑等的的数据加工方法。我们知道,数据加工的目的在于进一步提高机器人的性能。

1. 示教信息与机器人运动控制方式

工业机器人作业大致可以分为两种类型:搬运物体类型和喷漆类型。对于搬运物体类型机器人来说,定位点的位置与姿态具有重要意义;对于喷漆类型机器人来说,运动路径十分重要。与上述两种作业类型相对应,机器人运动控制方式也有两种方式,如图 1.14 所示^[14]。

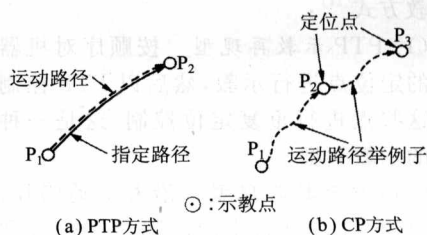


图 1.14 PTP 控制方式和 CP 控制方式

1) PTP 控制方式

只考虑机器人运动定位点的位置控制是否精确,点与点之间运动路径的控制方式为点对点控制方式,简称 PTP(Point To Point)控制方式。从文字上理解,这种控制方式就是控制机器人从一个点位到另一个点位的反复定位。对于物体搬运和点焊作业来说,它们只要求控制定位,不需要对定位点之间的运动路径和移动速度等加以精确的控制,所以它们很适合 PTP 控制方式。

2) CP 控制方式

不仅要分散的定位点的位置进行控制,还要把机器人连续运动的整个路径作为控制的目标,这种控制方式称为连续路径控制方式,简称 CP(Continuous Path)控制方式。CP 控制方式可以视为以时间为参数实现定位点的空间运动控制,为了与定点控制方式相对应,这种方法又被称为定路径控制。CP 控制方式主要应用于弧焊作业、喷漆作业等机器人的控制,这些作业都要求机器人以一定的运动速度,沿着规定的路径来实施作业。如果机器人采用 PTP 控制方式,只需要对定位点进行示教。实施 CP 控制方式时,则必须针对机器人的连续运动路径进行示教。连续运动路径的示教方法有两种:一种方法是在运动路径上按微小间隔标出点,逐一进行示教,并逐一存储起来供机器人运动再现时使用;另一种方法与 PTP 控制方式相同,只对运动路径上的代表点进行示教,同时也对它们之间的轨迹形状(例如,直线、圆弧等)进行示教,待机器人进行再现运动时,通过插补等运算使之复原。前一种方法称为直接 CP 控制方式,后一种方法称为插补 CP 控制方式。从这样的分类出发,根据示教的内容(PTP 型或 CP 型)和运动控制的方式,即与再现(play-back)方式的关系,可以整理成如下所示的三种示教方式^[14]:

(1) PTP 示教再现型 按顺序对机器人作业的定位点进行示教,然后以 PTP 控制方式对这些点进行重复定位控制,这是一种最基本的示教类型。

(2) CP 示教再现型 沿着运动路径,机器人边移动,边以微小的间隔进行位置和姿态示教,并存储和记忆数据,然后实现连续的再现运动。这种类型的示教方式,主要采用

直接示教方法,连续地对运动路径进行示教。机器人按一定的时间间隔或距离间隔,把示教数据存储记忆起来。由于存储数据量很大,通常采用磁带、磁盘等作为数据存储器。

(3) PTP 示教 CP 插补再现型 只对运动路径上的代表点进行示教,然后如图 1.15 所示那样,在这些代表点之间进行直线或圆弧等的插补处理,再现产生出预先给定的运动路径的控制方式。属于类型(2)的 CP 示教再现型机器人能够再现示教者所示教的动作,如果示教者的技术熟练,那么机器人就能模仿示教者做出娴熟的动作。进行作业时,如果机器人能精确地对作业工具的位置、姿态、运动速度等进行精确的控制,那么机器人甚至能比人做得更好。将插补 CP 控制方式与类型(2)的 CP 示教再现型相比,不仅能大幅度地缩减示教的存储数据空间,而且还更能体现机器人的机械特征,实现精确、均匀的运动。

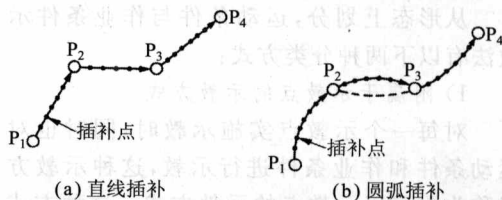


图 1.15 插补控制方式

实行插补 CP 控制方式时,需要不断针对给定的空间运动路径进行插补运算,以便满足运动再现的要求。这样一来,伴随着机器人的运动,必须根据各个插补点的位置来计算各个自由度对应的位移,因此要求机器人控制装置具有高速、复杂的计算处理能力。自 20 世纪 80 年代以来,计算机等电子技术得到长足的进步,实际上其很容易胜任上述计算的实时处理。由于插补 CP 控制方式的种种优点,它已经成为现阶段工业机器人主流的控制方式。

2. 示教信息的编辑加工方法

如果能够对示教后的信息进行一定的编辑加工,那么将有利于机器人实现更为复杂的运动。严格地说,示教信息的编辑加工方法应该对照前述的示教类型,即按照位置与姿态信息、顺序信息、条件信息进行分类。不过这里只重点介绍位置与姿态信息的编辑加工方法。

表 1.3 显示了示教信息编辑加工方法的主要功能。就位置与姿态信息而言,编辑加工的功能有移位功能(对示教点进行指定量的移位补偿)、坐标变换功能(对示教数据集进行三维坐标平移或旋转)、镜像变换功能(求取以线为对称轴的图形镜像)、缩放功能(对由示教点群构成的图形进行放大或缩小)等。以传感器对位置与姿态信息的编辑加工为例,采用接触式或非接触式传感器对各个示教点逐一进行移位检测和补偿^[14],或者采用视觉传感器检测物体的位置偏移量,再通过坐标变换功能进行补偿。

在机器人动作顺序信息的编辑加工方面,如图 1.16 所示,包括对示教点的更改、追加、删除等编辑功能。这种编辑功能对前述采用固定顺序示教方式的机器人而言是必备的。进一步看,若把一串示教点群编成一个集合块,对若干个集合块做任意组合、拷贝,构成重复运动路径,这种处理能起到狭义的编辑加工功能。分支选择功能也是一种狭义

的编辑加工功能,它能根据传感器信号对多个运动路径加以选择。

在同时编辑位置和姿态信息、顺序信息的示教功能的应用中有一种码垛功能,它能生成机器人整齐堆积物品的动作,因而可以将重复动作序列生成与定位点沿二维或三维方向移动的动作复合起来。研究表明,动作级的机器人语言,在同时处理位置和姿态信息、顺序信息编辑的这一类工作中是很有效的^[10]。

如果必须对位置和姿态信息、顺序信息、条件信息同时进行编辑加工,鉴于这三类信息的性质差异很大,所以往往要依据机器人的用途设计专用编辑加工功能。多层焊接功能就是其中一个典型的实例^[15]。在这种情况下,首先要从焊接坡口剖面形状决定各运动分支的移位量、动作、运动速度(即作业条件),并由此控制机器人重复各个分支的运动,完成作业。

以上事例均以示教点自身为对象,对它的位置、姿态、顺序等进行编辑加工。但是,

表 1.3 主要的示教信息编辑加工方法

对 象	功能名称	内 容
位置与姿态	移位功能	在指定的方向上使示教点移动指定的距离
	坐标变换功能	对示教点进行平移或旋转,对路径进行三维坐标变换
	缩放功能	对示教点集群构成的路径进行放大或缩小
	镜像变换功能	对示教点进行线对称移动,生成路径镜像图像
顺序	更改、追加、删除功能	更改或删除示教点和在示教点集群中新增添示教点
	块拷贝功能	拷贝示教点集群(块),生成可以反复运动的模式
	块编辑功能	对示教点集群(块)进行任意组合,生成系列动作序列
	分支选择功能	在轨迹包含分支时,选择分支的类型
位置、姿态与顺序	码垛功能	生成能使物体码垛堆积的动作
位置、姿态、顺序、条件	多层焊接功能	在计算多通道路径的位移量和动作条件的同时,控制相应的通道运动
路径形态	横摆运动功能	沿主路径叠加指定的辅助运动模式,形成反复的动作
	输送装置同步功能	在静止的状态下对作业对象进行示教,然后补偿输送装置的偏移量,实现再现运动

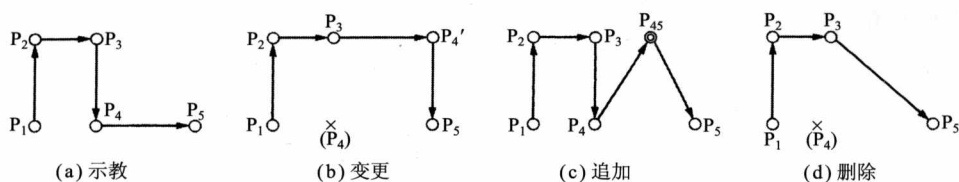


图 1.16 示教点的变更、追加和删除

对 PTP 示教 CP 插补控制方式的机器人来说,示教点之间的连接路径也可以视为给定的一个动作条件,因此产生一种在路径形态水平上的编辑功能。以图 1.17 中的横摆运动功能(weaving)为例加以说明。横摆运动是弧焊作业中常用的一种运动形态,它是将三角波或正弦波的辅助运动叠加到主路径上形成的^[11]。使用这个编辑加工功能时,先示教主路径上的代表点,然后示教(通过遥控示教法或数值输入法)需要叠加的辅助运动模式,就能简单地实现连续横摆运动,大幅度减少示教点的数目。

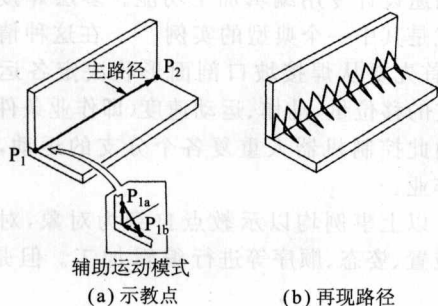


图 1.17 横摆运动功能

还有一种与此稍有不同的编辑加工功能,是以运动路径为对象进行编辑加工的^[16]。例如,输送装置的同步功能,它在作业对象固定的状态下实施示教,待运行起来后输送装置就能实现同步跟踪的移动作业功能。

三宅徳久

参考文献

1.2 作业示教方法

[1] S. Laerdal: Further Development and New Appli-

cation for the Trallfa Robot, Proc. 5th International Symposium on Industrial Robots (1975) pp.439-452

- [2] 平林ほか: 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No. 3 (1986) pp.95-102
- [3] 古川ほか: 垂直関節ロボット「Mシリーズ」, 日立評論, Vol.68, No.10 (1986) pp.7-12
- [4] 平井ほか: 言語介在型マスタ・スレーブ・マニピュレータシステム, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.1 (1984)
- [5] 新井ほか: フォト・アレイを利用した物体の位置・姿勢の測定, 精機学会学術講演会論文集 (1982) pp. 557-559
- [6] R. Goldman et al.: AL User's Manual, Stanford University Artificial Intelligence Laboratory Memo. 3rd Edition (1981)
- [7] J. Craig: Issues in the Design of Off-Line Programming Systems, Proc. 4th International Symposium of Robotics Research (1987) pp.43-53
- [8] K. Kamejima et al.: A Direct Mental Image Manipulation Approach to Interactive Robot Operation, Proc. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1988) pp.673-678
- [9] M. Ejiri et al.: A prototype intelligent robot that assembles objects from plan drawings, IEEE Trans. Computers, Vol.C-21, No.161 (1972)
- [10] 武田ほか: FA セル制御統一言語「FA-BASIC」, 日立評論, Vol.64, No.9 (1985) pp.25-30
- [11] 井田ほか: 新型日立プロセスロボット, 日立評論, Vol.64, No.12 (1982) pp.11-16
- [12] 宇田川ほか: 溶接条件自動設定システム, 溶接学会全国大会講演概要第42集 (1988) pp.15-18
- [13] 小山ほか: ペトリネットを用いたFAセル制御言語の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5 (1999) pp.649-657
- [14] 土橋ほか: ロボットの機構と制御技術, メカトロニクス・シリーズIV (日本機械学会編), 技報堂出版 (1984) pp.71-97
- [15] N. Miyake et al.: Multi-pass Welding of Nozzles by an Industrial Robot, Proc. 10th International Symposium on Industrial Robots (1980) pp.51-59
- [16] S. Ando, et al.: Computer Controlled Industrial Robot for Painting, Proc. 9th International Symposium on Industrial Robots (1979) pp.689-700

第2章 机器人的建模与标定

2.1 机器人的建模

2.1.1 机械手的运动学模型

对机械手运动无论是进行控制研究还是运动仿真,都需要机械手的运动学模型。一般情况下,机械手的运动学模型可以用以下形式的微分方程予以描述:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.1)$$

其中,

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T, \quad \boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$$

式中, \mathbf{q} 和 $\boldsymbol{\tau}$ 分别为机械手的关节变量向量、关节力矩(或力)向量; $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为惯性矩阵; $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为离心力或哥氏力向量; $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 为重力向量; n 为机械手的自由度。

一般说来,机械手的运动学模型是一个非常复杂的非线性系统。如果掌握了精确的模型,那么控制系统的设计就可以采用基于模型的控制方法^[1],或者计算力矩的方法,它们往往很精确,而且预测性也很准。特别是可以使用它的一种变形,即被称为标准控制器^[2]的前置补偿器。由于运动学模型被线性解耦和规格化后,所有机械手的运动学模型都变得一样,于是凸显出控制程序可移植性的优点。此外,在机械手的力控制和阻抗控制中,稳定性的问题至关重要,运动学模型更是不可缺少。因此,机械手的运动学建模是机器人学中一项十分重要的基础工作。

应用拉格朗日方法或牛顿-欧拉方法可以推导出机械手的运动学模型。下面我们采用后一种方法,即牛顿-欧拉法来推导运动学模型^[3]。如果视机械手为一条开式运动链,由转动关节将 n 个刚性杆件串联在一起。运动链的一端通过关节与机械手的底座(设底座为杆件 0)连接,然后朝机械手开放端的方向,依次从 1 开始对关节和杆件进行编号。为了便于描述机械手的运动,如图 2.1 所示那样,将坐标系 $\Sigma_i(O_i - X_i Y_i Z_i)$ 按右手法则固定在第 i 节杆件上。坐标原点 O_i 位于第 i 个关节

轴上的关节轴 i 与关节轴 $i-1$ 的公共垂线的垂足处,坐标轴 Z_i 指向关节轴 i 的方向,坐标轴 X_i 指向关节轴 i 与关节轴 $i-1$ 之间公共垂线的方向。关节角 q_i 定义为 X_i 轴相对于 X_{i-1} 轴绕 Z_i 轴旋转的角度,扭角 α_i 定义为 Z_i 轴相对于 Z_{i-1} 轴绕 X_{i-1} 轴旋转的角度。

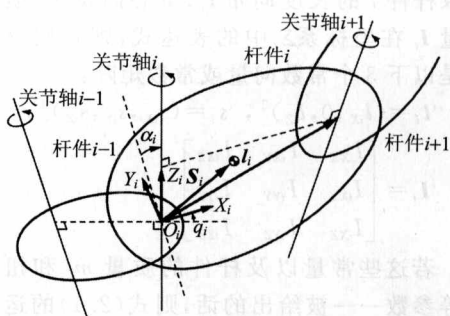


图 2.1 机械手的杆件坐标系

设从 O_i 指向 O_{i-1} 的向量 \mathbf{l}_i 为杆件 i 的长度向量,并用 m_i 、 \mathbf{s}_i 、 \mathbf{I}_i 分别表示杆件 i 的质量、从原点 O_i 指向杆件 i 重心的向量、绕 O_i 的惯性张量,则可以导入以下物理量:

$$\bar{m}_i = m_i + m_{i+1} + \dots + m_n$$

$$\mathbf{r}_i = m_i \mathbf{s}_i + \bar{m}_{i+1} \mathbf{l}_i$$

$$\mathbf{J}_i = \mathbf{I}_i + \bar{m}_{i+1} [(\mathbf{l}_i \cdot \mathbf{l}_i) \mathbf{E} - \mathbf{l}_i \otimes \mathbf{l}_i]$$

$$\bar{\mathbf{r}}_i = \mathbf{r}_i + \mathbf{r}_{i+1} + \dots + \mathbf{r}_n$$

式中, \mathbf{E} 为单位张量; \bar{m}_i 、 \mathbf{r}_i 、 \mathbf{J}_i 分别为相对于扩展杆件的原点 O_i 的零阶矩、一阶矩和二阶矩,扩展杆件由杆件 i 在位置 \mathbf{l}_i 处附加质量 m_i 构成。

将这些量代入式(2.1)的运动模型中,求得惯性矩阵 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 的 (i, j) 元素 $M_{i,j}(\mathbf{q})$ 如下:

$$\begin{aligned} M_{i,j}(\mathbf{q}) = & Z_i \cdot \left(\sum_{s=1}^n \mathbf{J}_s \right) Z_j \\ & + Z_i \cdot \left[\sum_{s=i}^{n-1} (2(\mathbf{l}_s \cdot \bar{\mathbf{r}}_{s+1}) \mathbf{E} - \mathbf{l}_s \otimes \bar{\mathbf{r}}_{s+1} \right. \\ & \left. + \bar{\mathbf{r}}_{s+1} \otimes \mathbf{l}_s) \right] Z_j + Z_i \cdot \left[\left(\sum_{s=j}^{i-1} \mathbf{l}_s \cdot \bar{\mathbf{r}}_i \right) \mathbf{E} \right. \\ & \left. - \sum_{s=j}^{i-1} \mathbf{l}_s \otimes \bar{\mathbf{r}}_i \right] Z_j \quad (i \geq j) \end{aligned}$$

$$M_{i,j}(\mathbf{q}) = M_{j,i}(\mathbf{q}) \quad (j > i) \quad (2.2)$$

此外,设向量 $h(q, \dot{q})$ 的第 i 个元素 $h_i(q, \dot{q})$ 为

$$M_{i,j,k}(q) = \frac{\partial M_{i,j}(q)}{\partial q_k} - \frac{\partial M_{k,j}(q)}{2\partial q_i}$$

于是可得

$$h_i(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n M_{i,j,k}(q) \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (2.3)$$

进而,设重力加速度向量用 g 表示,则重力向量可以表示成

$$g(q) = -g \cdot (Z_i \times \bar{r}_i) \quad (2.4)$$

式(2.2)~式(2.4)是与坐标系无关的向量形式,但最终还是需要选择适当的坐标系 Σ_i ,并在该坐标系下开展向量运算。如果需要,还可以用变换矩阵进行坐标变换。若要求取杆件 i 的长度向量 l_i 、重心向量 s_i 、惯性张量 I_i 在坐标系 Σ_i 中的表达式,则它们分别就是以下3个常数向量或常数矩阵:

$$l_i = (l_{ix}, 0, l_{iz})^T, \quad s_i = (s_{ix}, s_{iy}, s_{iz})^T,$$

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{ixx} & I_{ixy} & I_{ixz} \\ I_{ixy} & I_{iyy} & I_{iyz} \\ I_{ixz} & I_{iyz} & I_{izz} \end{bmatrix}$$

若这些常量以及杆件的质量 m_i 和扭角 α_i 等参数一一被给出的话,则式(2.1)的运动模型也就可以被确定了。

在这些常参数中,由于 l_{ix} 、 l_{iz} 、 α_i 确定了机械手的机械结构和运动学特性,在使用关节向量 q 计算手部位置向量 x 的同时也就决定了变换矩阵。因此,它们被称为机械手的机构参数。下面的 $10n$ 个参数 m_i 、 $m_i s_{ix}$ 、 $m_i s_{iy}$ 、 $m_i s_{iz}$ 、 I_{ixx} 、 I_{iyy} 、 I_{izz} 、 I_{ixy} 、 I_{ixz} 、 I_{iyz} 确定了运动学模型的动力学特性,因而它们被称为机械手的动力学参数。在运动学模型中通常采用 s_i 和 m_i 相乘的表现形式,因此我们也决定采用这样的参数来表示机械手的动力学参数。

很显然,要得到机械手的运动学模型必须搞清楚系统的机构参数和动力学参数。从机械手的设计数据在一定程度上能够得到系统的机构参数,但是由于杆件加工误差和机构装配误差的影响,有时它们并非完全正确。特别是扭角 α_i 的误差将对手部位置误差产生重要影响。

再看动力学参数。由于杆件质量分布不均匀,准确地计算杆件的重心位置和惯性矩矩阵实际上是很困难的。即便将机械手杆件分解后分别进行测量,实际上也有诸多不便。

因此,有必要开发推算机械手各种参数的标定方法。这种方法应该能在机械手的使用状态条件下,让机械手做各种各样的运动和姿势,通过测量手部位置、关节转角、输入力矩等数据推算这些参数。在2.2节中将就此做进一步的阐述。

即使给定机械手的机构参数,动力学参数标定(也称为参数辨识)的一个根本问题是有时无论让机械手做怎样的运动,也无法推算出全部 $10n$ 个动力学参数。查看式(2.1)~式(2.4)可以发现,这些参数均能用下式表示:

$$\sum_u p_u f_u(q) \quad (2.5)$$

式中, p_u 为动力学参数的线性组合; $f_u(q)$ 为 q 的元素的三角函数多项式。因此,确定系统的运动学模型,只需要知道 p_u 就行了。通常将 p_u 的最小集合元素称为基底参数(base parameter)^[4]。理论上说,这些 p_u 的数值可以从足够多的运动数据推算出来。式(2.5)表明,对运动学模型而言,动力学参数和基底参数都具有线性特性,这不但是一个非常有趣的事实,而且对运动学模型的辨识也是非常有用的。

前田浩一

2.1.2 基底参数的分析

要计算机器人的运动方程式,机构参数和基底参数都是必不可少的。这里介绍在已知机构参数的条件下求解基底参数的方法。在动力学参数中,有杆件的质量 m_i 、一阶矩 $m_i s_i$ 、惯性张量 I_i 。正如2.1.1节中所指出的(在第3篇2.3.4节的性质5中也有叙述),可以定义杆件 i 的动力学参数 σ_i 为:

$$\sigma_i = (m_i, m_i s_{ix}, m_i s_{iy}, m_i s_{iz}, I_{ixx}, I_{iyy}, I_{izz}, I_{ixy}, I_{ixz}, I_{iyz})^T \quad (2.6)$$

设全部动力学参数为

$$\sigma = (\sigma_1^T, \sigma_2^T, \dots, \sigma_n^T)^T \quad (2.7)$$

此时机器人的运动方程为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.8)$$

可以表示成为基底参数 σ 的线性表达式如下:

$$\tau = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\sigma \quad (2.9)$$

式中, W 为回归矩阵,它不含基底参数 σ 。

由于式(2.9)是有关参数的线性表达式,故让机器人适当地进行运动,并代入观察值

q, \dot{q}, \ddot{q} 和关节驱动力的输入值 τ , 就可以辨识出基底参数 σ 。在这种场合, 按照是否可以辨识, 把参数划分成三种类型:

① 可辨识参数。让机器人进行适当运动后即可推算出参数的正确值。

② 只有线性组合才可以辨识的参数。让机器人适当运动后可以正确推算出线性组合的参数值。

③ 不可辨识参数。无论让机器人做任何运动都无法推算出正确的参数值。

设参数 σ_i 是基底参数 σ 的第 i 个元素, 与 σ_i 对应的 W 矩阵的第 i 列向量记为 w_i 。我们知道, 不能给与关节驱动力任何影响的参数是不可辨识的。说参数 σ_i 不能给与关节驱动力任何影响, 就意味着 w_i 是一个零向量。因此, 当 $w_i = 0$ 时, 参数 σ_i 是不可辨识的; 当 w_i 不能用 $w_j (j \neq i)$ 的线性组合表示时, 参数 σ_i 是可以辨识的; 若 w_i 与参数 q, \dot{q}, \ddot{q} 的值无关, 能用 $w_j (j \neq i)$ 的线性相关表示时, 单独的参数 σ_i 是不可辨识的, 但是通过适当的线性组合方是可辨识的, 即设 μ_i 是常数标量, w_i 可以表示成

$$w_i = \sum_j \mu_j w_j \quad (j \neq i) \quad (2.10)$$

时, 可以通过把 w_i 置换成零向量, 把 σ_j 置换成 $(\sigma_j + \mu_j \sigma_i)$, 将参数 σ_i 消去。在这种情况下, 如果 w_j 不能用其他列向量的线性组合来表示, 那么 $(\sigma_j + \mu_j \sigma_i)$ 是可辨识的, 如果 w_j 线性相关, 那么用同样的方法可以把 $(\sigma_j + \mu_j \sigma_i)$ 从式 (2.10) 中消去。

根据线性组合的原则, 设仅由可辨识参数组成的向量为 σ_{\min} , 则 σ_{\min} 是基底参数, 可表示成如下形式:

$$\sigma_{\min} = K\sigma \quad (2.11)$$

式中, K 为 $m \times 10n$ 的常数矩阵。 σ_{\min} 的元素数 m 由机器人的机械结构和重力作用方向决定。由式 (2.11) 可以求得 σ_{\min} 与 τ 的关系为

$$\tau = W_{\min} \sigma_{\min} \quad (2.12)$$

还存在关系

$$W = W_{\min} K \quad (2.13)$$

显然, W_{\min} 的任意第 i 列向量无法用其他向量的线性组合来表示。基底参数的表现形式是多种多样的。例如, 有一种形式为

$$\sigma_{\min}^* = L\sigma_{\min} \quad (2.14)$$

其中, L 必须是正则的 $m \times m$ 常数矩阵。

解析处理上述公式有两条途径: 一条是数值分析^[6]; 另一条是数学公式^[6,7]。后者可以避免数值计算误差的影响, 得到严密的解析解, 而有关数值分析方法的介绍请参考第 5 篇 5.3.4 节的有关部分。

针对串联连杆机构和树状连杆机构, 有人给出从连杆机构的空间配置求解可辨识参数的方法^[8~10]。川崎等^[10]对连杆机构的空间配置类型做了分类, 提出用递归公式方法推算基底参数的算法。只要定义好机器人的机构条件, 该系统就能自动地求出机器人的基底参数, 读者可以参考。

2.2 机器人的标定

2.2.1 机构参数的标定

1. 机构参数的选定

D-H(Denavit-Hartenberg)方法用 4 个机构参数(也称为杆件参数)描述机器人杆件之间的相对位置和姿态(参见第 3 篇 2.2.1 节中 4.)。使用 D-H 方法中的参数有时会产生无法标定参数的情况。如图 2.2 所示, 当相邻连接的两个关节轴 z_{i-1} 轴和 z_i 轴相互平行($\alpha_i = 0$)时, 杆件之间距离 d_i 的长度是任意的, a_i 为两个关节轴之间的距离。当 z_{i-1} 轴和 z_i 轴处在同一平面内且接近平行(即 $\alpha_i \approx 0$)时, 杆件之间的距离 d_i 变得非常大, 而两个关节轴之间的距离 a_i 则等于零。这样一来, 在扭角 α_i 为零的邻域, 对 α_i 的一点微小变化, d_i 和 a_i 都会非常敏感, 甚至产生不连续的变化, 从而导致标定时 α_i 的测量误差将给 d_i 和 a_i 的计算精度带来十分严重的影响。为此, 有必要对 D-H 方法的参数予以修正。

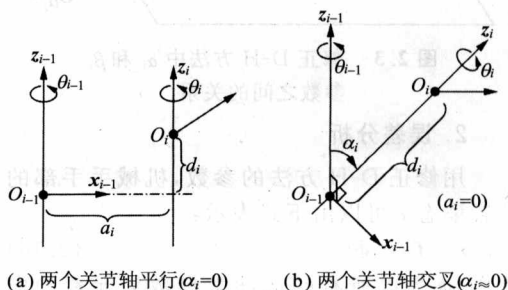


图 2.2 在扭角 $\alpha_i = 0$ 邻域的杆件参数

如图 2.3 所示, 引入扭角 β_i 对 D-H 方法进行修正, 结果在修正 D-H 方法中, 可以用 5

个参数为 $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i, \beta_i$ 表示相邻杆件之间的相对关系。在图 2.3 中, 设 z_{i-1} 轴垂直平面与 z_i 轴的交点为 O_i , 从原点 O_{i-1} 朝向原点 O_i 的方向为 x_{i-1} 轴的方向, 按右手法则, y_{i-1} 轴的方向由其与 x_{i-1} 轴共同构成的坐标系来确定。按此方式确定坐标轴, 并按 D-H 方法定义 θ_i, a_i, d_i 及 α_i , 则扭角 β_i 就是绕 y_{i-1} 轴测得的从 z_{i-1} 轴向右转动到 z_i 轴的角度。该修正参数使 d_i 和 a_i 的变化对 α_i 的微小变化不再敏感, 因此可以说这些机构参数对机器人参数标定来说是适合的。当 z_{i-1} 轴与 z_i 轴几乎平行时, 杆件之间的距离 d_i 仍可以任意确定。因此, 让 D-H 方法中的 4 个机构参数与修正 D-H 方法中的 θ_i, a_i, d_i 及 α_i 参数值一致, 并设扭角 β_i 为零, 即可以这些参数值为基础对机器人进行标定。这时, 修正 D-H 方法得到的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i^*$ 可以由下式给出:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}T_i^* &= \text{Rot}(y, \beta_i) \text{Trans}(a_i, 0, 0) \\ &\quad \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \\ &\quad \text{Rot}(z, \theta_i) \\ &= \text{Rot}(y, \beta_i) {}^{i-1}T_i \end{aligned} \quad (2.15)$$

式中, ${}^{i-1}T_i$ 为对应于 D-H 方法中的齐次变换矩阵。当相邻关节轴正交或接近正交时, 由于 d_i 和 a_i 的变化对 α_i 的微小变化均不敏感, 故用 D-H 方法中的 4 个机构参数进行机器人的标定也是可行的。

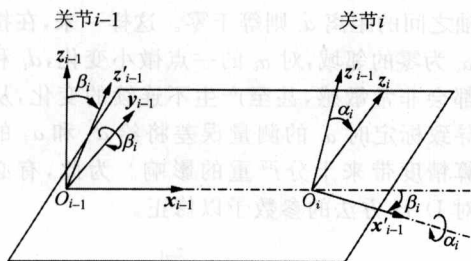


图 2.3 修正 D-H 方法中 α_i 和 β_i 参数之间的关系

2. 误差分析

用修正 D-H 方法的参数, 机械手手部的位姿 r 可以由下式表示:

$$r = f(q, \phi) \quad (2.16)$$

式中, ϕ 为以所有的运动学参数为元素的向量。参数 ϕ 存在微小的误差 $\Delta\phi$, 它会造成机器人手部位姿的微小变分 Δr , 两者之间的关系如下式所示:

$$\Delta r = J_\phi \Delta\phi \quad (2.17)$$

其中, J_ϕ 可以由参数 ϕ 的雅可比矩阵给出:

$$J_\phi = \frac{\partial f}{\partial \phi^T} \quad (2.18)$$

3. 机械手手部位置姿态的微小变分

在进行机构参数的标定时, 机械手手部位置姿态的变分 Δr 可以由下式得到:

$$\Delta r = r_m - r_c \quad (2.19)$$

式中, r_m 为机械手手部位置姿态的测量值; r_c 为机械手手部位置姿态的计算值。

将变分 Δr 按位置和姿态进行分解, 位置变分 Δr_p 可以表示成

$$\Delta r_p = r_{pm} - r_{pc} \quad (2.20)$$

式中, r_{pm} 为手部位置的测量值; r_{pc} 为手部位置的计算值。设 p^* 是固定于手部坐标系的任意向量, R_m 为描述手部姿态的旋转矩阵, R_m 的测量值, R_c 为它的计算值, 则姿态的微小转动 Δr_o 可以表示成类似角速度向量的形式, 并满足以下关系:

$$\Delta r_o \times R_c p^* = R_m p^* - R_c p^* \quad (2.21)$$

由于任意的 p^* 都能满足式 (2.21), 故可以把式 (2.21) 的向量乘积形式改写成矩阵形式为

$$S(\Delta r_o) = (R_m - R_c) R_c^T \quad (2.22)$$

式中, $S(*)$ 为把向量积变换成矩阵形式后的应变对称矩阵。进而从式 (2.20) 和式 (2.22) 可以求得 $\Delta r = [\Delta r_p^T, \Delta r_o^T]^T$ 。

4. 机构参数估计

按照修正的 D-H 方法, 具有 n 个杆件的机器人手臂共有 $5n$ 个机构参数。为了能高精度地标定机构参数, 应该对手部的位姿进行多次测量。为此, 需要 N 次驱动机械手手部使其处于不同的位置姿态, 并对每一次位置姿态进行测量, 得到

$$y = A \Delta\phi \quad (2.23)$$

这里, 如果设第 i 次的测量数据为 $\Delta r(i)$, $J_\phi(i)$, 则有

$$y = (\Delta r(1)^T, \Delta r(2)^T, \dots, \Delta r(N)^T)^T \quad (2.24a)$$

$$A = (J_\phi(1)^T, J_\phi(2)^T, \dots, J_\phi(N)^T)^T \quad (2.24b)$$

用最小二乘法估计 $\Delta\phi$, 其值可用下式求得

$$\Delta\phi = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (2.25)$$

于是, 被更新的机构参数 ϕ' 可以由下式求得

$$\phi' = \phi + \Delta\phi \quad (2.26)$$

机构参数 ϕ 是非线性方程式 (2.16) 的解,

故可以反复操作上述更新,直到 $\Delta\phi$ 趋近于零,参数 ϕ 收敛到某一定值为止。在反复操作计算的过程中,应该用最新值计算式(2.18)的雅可比矩阵^[11]。

川崎晴久

2.2.2 基底参数的辨识方法

让机械手做适当的试验运动,测量关节变量 q 、关节驱动力矩(或力) τ 随时间变化的数据,由此可以求得机械手的机构参数。在2.1.2节中介绍了利用这些机构参数推算机械手基底参数具体数值的方法。以下介绍相关的三种参数推算方法:同时估计法、逐次估计法及混合估计法,混合估计法是前两种方法的结合。

1. 同时估计法

正如2.1.2节中所介绍的那样,在时刻 t ,机械手的 n 维关节变量向量 $q(t)$ 、 n 维关节驱动力矩(或力)向量 $\tau(t)$ 、 m 维基底参数集向量 σ_{\min} 之间存在如下关系:

$$\tau(t) = W_{\min}(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))\sigma_{\min} \quad (2.27)$$

一般说来,在式(2.27)中由于 $m > n$,所以仅从式(2.27)是无法估计出 σ_{\min} 的。但是通过测量获取在 t_1, t_2, \dots, t_N 时刻机械手的运动数据,假设 $u(N) = (\tau^T(t_1), \tau^T(t_2), \dots, \tau^T(t_N))^T$, 以及 $W(N) = (W_{\min}^T(t_1), W_{\min}^T(t_2), \dots, W_{\min}^T(t_N))^T$, 由于 $u(N) = W(N)\sigma_{\min}$, 选择 N 满足关系式 $nN > m$, 则通过下式:

$$\sigma_{\min} = (W^T(N)W(N))^{-1}W^T(N)u(N) \quad (2.28)$$

可以估计基底参数集向量 σ_{\min} 。不过,为了保证 $W^T(N)W(N)$ 的正则性必须充分进行各种加速度运动试验。由于运动数据中含有噪声, N 必须取得相当大(对4~6个自由度的机械手,按照经验需要数万个以上)。式(2.28)是最小二乘估计方法,若改用有关 N 的递归估计算法^[11]可以减少计算量。

已经应用上述辨识基底参数集向量 σ_{\min} 的方法实现了几个计算事例^[1,12]。式(2.28)所含的有关角加速度 $\ddot{q}(t)$ 、力矩(或力) $\tau(t)$ 的数据误差很大。有人建议,为了消除在这种情况下的基底参数估计值偏差,可以采用所谓的辅助变量法^[5]。还有另外一种办法,是

对 $u(N) = W(N)\sigma_{\min}$ 的两边进行积分,然后消去 $\dot{q}(t)$ 。

同时估计法可以一次性地估计出所有的基底参数值,由于是在计算机上运算,也很简单,但是只有适当的运动试验方法能够保证递归估计的正确性和快速收敛性,而恰恰在设计适当的运动试验方法方面人们还缺乏经验。

2. 逐次估计法

逐次估计法是寻找某些简单的运动实验。它们与考察运动学模型力学意义的基底参数中尽量少的子集有关,通过这些简单运动实验的数据对基底参数子集的数值进行估计,然后针对基底参数子集补偿和消元的运动学模型反复进行相同的操作,直至估计出全部基底参数为止。

首先,让机械手在各种姿势下处于静止状态,从此时关节力、力矩、重力等的平衡数据估计与一阶矩有关的基底参数,称此为静止实验。

其次,让机械手的逐个关节在不同速度下做匀速运动,从此时补偿速度和重力项的力、力矩的关系,估计该关节的黏性摩擦系数和动摩擦力及力矩,称此为匀速度运动实验。

最后,让各个关节分别做加速运动,从补偿加速度、重力项、摩擦项的力和力矩的关系,估计与零阶矩、二阶矩相关基底参数的值,称此为加速度运动实验。应该指出,试验中同时运动的关节不宜超过两个。

可以列举一些用这样的方法进行辨识的例子^[13,14]。尽管逐次估计法能够有针对性地设计运动实验来实现对一些特定基底参数的精确估计,但是它的缺点是需要的试验次数很多。特别是加速度运动实验,依照运动关节的组合和顺序需要逐个进行实验,相当麻烦。此外,由于后一个估计用到前一个估计的结果,也存在着误差累积的问题。

3. 混合估计法

考虑到逐次估计法的加速度运动实验既复杂又麻烦,所以人们又提出了一种新的方法,只需要进行静止实验和匀速度实验,将实验所得到的部分基底参数作为已知条件,采用缩小尺度的同时估计法对剩余基底参数进行估计,这种方法被称为混合估计法。

混合估计法既简单,估计收敛速度又快,

精度也不错,因此可以说它是最实用的一种方法,它的实验实例已经有了一些报道^[15,16]。

前田浩一

4. 机器人手部负载的辨识

除了手部负载和摩擦力之外,可以说机器人的动力学参数几乎是不变的。手部负载的变化多数随作业内容或夹持对象物的不同而变化。实际上,手部负载可以一并考虑成包含在杆件 n 上,因此手部负载变化相当于杆件 n 的动力学参数的变化。如果动力学参数已知,那么它们可以用杆件 n 动力学参数的变化部分与关节驱动力矩之间的关系式描述出来。该关系式可以用来辨识手部负载的变化^[17]。

设受负载变化的影响,杆件 n 的参数从 σ_n 变成 $\sigma_n + \Delta\sigma_n$, 关节驱动力从 τ 变成 $\tau + \Delta\tau$, 于是由式(2.9)可得

$$\Delta\tau = W[0, 0, \dots, 0, \Delta\sigma_n^T]^T \quad (2.29)$$

设式(2.29)中的 W 为:

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_n] \quad (2.30)$$

则式(2.29)可以改写成

$$\Delta\tau = W_n \Delta\sigma_n \quad (2.31)$$

式中, W_i 为对应参数 σ_i 的在 W 中的子矩阵。利用在 2.1.2 节中介绍的方法,由式(2.31)可以对变化参数中的可辨识参数进行分析。于是,手部承载时的实际驱动力 τ_m 与基于负载标称值计算出的驱动力 τ_c 之间的差值 $\Delta\tau$ 可以由下式算出:

$$\Delta\tau = \tau_m - \tau_c \quad (2.32)$$

在用回归方法对基底参数进行解析计算时,由于除去线性无关的列向量之外,其余向量均被消元,故与被消元的列向量对应的参数均为零,因此允许采用动力学参数的动力学算法进行计算。同样地,在辨识机械手负载的变化参数时,由于与消元的 W_n 的列向量相应的参数也为零,故可以求得手部杆件等价动力学参数的变化部分,并将计算结果叠加到变化前的参数上进行动力学计算。

川崎晴久

参考文献

第2章 机器人的建模与标定

- [1] C. H. An, C. G. Atkeson and J. M. Hollerbach : Model-Based Control of a Robot Manipulator,

MIT Press (1988)

- [2] H. Mayeda : Task Directed Robotics, Proc. of 4th Japan-France Congress & 2nd Asia-Europe Congress on Mechatronics, Vol.1 (1998) pp.17-22
- [3] 前田: ロボットアームの動的モデルと同定, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2 (1989) pp.203-208
- [4] H. Mayeda, K. Ohashi and K. Osuka : Base parameters of manipulator dynamic model, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No.3 (1990) pp.312-321
- [5] M. Ghodoussi and Y. Nakamura : Principal Base Parameters of Open and Closed Kinematic Chains, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1991) pp.84-89
- [6] 川崎晴久, 村田敦, 神崎一男: 数式処理による閉リンクマニピュレータの最小動力学パラメータの解析法, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4 (1995) pp.558-564
- [7] H. Kawasaki and T. Shimizu : Symbolic analysis of robot base parameter set using Grobner-basis, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.10, No.10 (1998) pp.475-481
- [8] W. Kalil, F. Bennis and M. Gautier : The use of generalized links to determine the minimum inertial parameters of robots, Jour. of Robotic System, Vol.7, No.2 (1990) pp.225-242
- [9] H. Mayeda and K. Ohasi : Base parameters of dynamic models for general open kinematics chains, Robotics Research, Vol.5 (1991) pp.271-278
- [10] H. Kawasaki and K. Kanzaki : Minimum Dynamic Parameters of Robot Models, SYROCO '91 (eds. I. Troch, K. Desoyer and P. Kopacek), Pergamon Press (1991) pp.33-38
- [11] 川崎: C&FORTRAN による数値解析の基礎, 共立出版 (1993) pp.183-187
- [12] 川崎, 西村: マニピュレータのパラメータ同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.1 (1986) pp.76-83
- [13] H. Mayeda, K. Osuka and A. Kangawa : A New Identification Method for Serial Manipulator Arm, Proc. of 9th IFAC World Congress (1984) pp.2429-2434
- [14] 大須賀, 前田: マニピュレータの動特性同定法, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.6 (1986) pp.76-83
- [15] 吉田, 池田, 前田: 6自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的研究, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4 (1993) pp.84-93
- [16] T. Yasuho, Y. Omaki, T. Nampo and H. Mayeda : Identification and Model Based Control of A 6 D. O. F. Industrial Manipulator, Prep. Of 5th IFAC Symposium on Robot Control Vol.1 (1997) pp.117-123
- [17] H. Kawasaki and K. Nishimura : Terminal-link parameter estimation of robotic manipulators, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.5 (1988) pp.485-490

第3章 机器人控制器

3.1 控制器

3.1.1 机器人控制器的定义

机器人控制器的概念在工业机器人上体现得尤为显著,这大概是它源于工业机器人本体近旁放置的大型控制柜(控制箱, control plate)的缘故吧。近年来,随着电子技术和计算机的发展,构成机器人的两大要素,即机器人机构和控制柜之间的关系也发生了很大的变化。

典型的变化趋势是机器人的网络化、分散化,机器人控制柜不再必须靠近机器人机构了,机器人与控制器之间更不需要一一对应了。鉴于这种趋势,可以把机器人的控制器当作是“执行机器人控制功能的一种集合”,在此理念下尝试机器人控制器的功能分层化和控制系统的集成化。本章将概略地介绍正朝着这样的新趋势过渡的机器人控制器的现状。

不过应该指出,这里阐述的机器人控制器的观点未必能够得到大多数设计者的认可。虽然本文所描述的内容可能只是一孔之见,但希望能够以此作为新型控制器设计的契机。

3.1.2 控制器的功能与分层递阶结构

机器人系统的分层递阶结构并非是一种统一的模式,但是抛开机器人各自为了结构优化而产生的某些细微区别后,它们在必要的功能方面,并未呈现出本质的差异。图 3.1 给出了机器人控制功能分层处理和整合后的例子。当然,实际设计机器人时允许按照具体要求进行修正。下面按照图 3.1 中编号的顺序对控制的流程给予简单的说明。在本书相应的小节中对各种功能安排了详细的解说,因此在这里主要从系统的角度解释它们的关系。

1. 机器人控制系统的功能

1) 示教器

所谓示教,就是操作者对机器人发布作业、动作、运动之类的命令。示教输入的手段除了各种开关、操纵杆、键盘、画面输入等通用的方式之外,机器人还配置一些固有的示教手段,如在机器人动作端的直接示教、悬吊式示教盒、主臂等。

2) 智能遥控

关于如何将操作者(人)的意图解读成能被机器人(机器)执行的信息,即转换成数学公式或数字的问题,人们提出了各种设想,例如,从简单的(on · off)开关,到符号化语言(机器人语言等),甚至能揣测人的情感和逻辑的表达方式。为了有助于人的理解,有效并恰当地表示机器人的状态也很有用,它们应该与显示处理系统直接连接起来。

3) 作业(移动)规划

简言之,所谓作业规划就是生成作业的顺序。显然,这个阶段的表现方式应该能够达到人能够理解的水平,但要达到应对人类语言的模糊性还有待提高。如果我们对机器人直接发出关节角度命令,那么无需建立作业顺序的概念,此时作业规划系统可以采用简单的旁路处理,交付给作业规划系统处理显然是多余的。之所以将通常的机器人控制结构设计成分层递阶的集成化系统,是出自便于它们将来扩展功能、统一维护、有效利用软件资源等方面的考虑。

对于移动机器人而言,在很多情况下应用作业的概念并不确切。此时的任务多半是在地图上用移动规划来管理机器人运动的位置、时间,粗略生成行走或无障碍物的轨迹(导航)。

4) 运动规划

运动规划这一级的主要任务是基于上面作业和移动的规划,生成适合现场作业或移

7) 伺服驱动器

最新的伺服驱动器能满足位置、速度、转矩等各项控制,只要根据控制目标选用即可。传统的伺服电机和伺服驱动器的匹配是固定的,不过这种情况现在已经发生了改变,最新的趋势是只要电机和驱动器设计得合理,不同厂家的产品也能通用。这要归功于软件控制的引入。

8) I/O 传感器

在反馈控制中,3)~7)项得到普遍应用。它们的应用要求采用各种传感器来掌握机器人各层级的状况,最初的想法是将传感器布置在控制系统的各个层级上,不过,层级越是靠上,传感越困难,可靠性也越低。所以,传感器一般都配置在控制系统的下位层级,此时它们要充当观测器来推测系统的状态,从系统开放性(后面将涉及)的角度看,传感器的输入端口应该统一起来。

9) 传感器信息转换(物理量)

传感器获取的原始数据需要转换成最简单的物理量,并以适合伺服系统的反馈信息(位置、速度、转矩)进行输出,同时还要直接向上传送机器人上位系统所需要的信息。

10) 运动状态信息处理

这个部分将运动控制需要的信息加工后传送给运动控制系统,将机器人上位系统需要的信息传送给上位系统。在传感器信息转换系统中,只有上位系统必需的未处理信息才进行旁路输出。

11) 动作状态信息处理

该部分用来加工运动规划必需的信息并输出到运动规划单元,同时也将上位系统需要的信息传送给上位系统。在运动状态信息处理系统中,只有上位系统必需的未处理信息才进行旁路输出。

12) 作业信息处理

该部分对作业规划必需的信息进行加工,然后输出到作业规划单元,同时输出显示和诊断异常信息所需要的信息。

13) 显示处理

希望统一显示各种必需的信息(调整、维护信息除外)。显示的内容应该尽量与实时控制(定时采样)无关,若实在无法避免实时相关性,应该在最小限度内进行选择。

14),15) 运动、动作信息处理

机器人状态的监控对防患于未然和远程操作的支持等都非常重要。在运动、动作信息处理系统中,也要在适当的时间内对各层级的状态进行处理,并以反馈信息的形式输出到智能遥控单元。

16)~19) 例外信息处理

耐用的产品必须具有足够的可靠性和可维护性。因此,有必要在控制系统内部从最低层级开始逐级建立例外处理功能。由图3.1可知,在传感器信息处理层设置了相应的例外处理系统。其实在不同层级都应该安排适当的时间执行例外信息的处理,以防止因例外处理滞后所造成的二次损害。

20) 异常处理

所谓异常就是无法预测的事件。该部分对各层级的信息和当前信息做适当的诊断,判断异常事件发生的可能性,并通过有效的显示提醒操作者。

21)~23) 与外部设备的连接

与外部机器人连接应该建立在控制系统中相同层级之间的连接基础上(例如,双臂机械手完全允许相同处理),但是这样仍然会造成整个系统的复杂化。因此,若无特殊的需要,建议仅以接口的方式将最下层的传感器信息系统或最上层的作业信息处理系统连接起来。

2. 回路信息处理型分层递阶系统

图3.1中信息的流向为单方向的。在流程中,如果上面的处理未结束就无法起动下面的处理,或者说由于无法通过其他控制系统的状态以中断的形式改变控制律,所以很多人都将系统设计成中断方式。不过一旦引入中断方式,就引出以下两个问题:

① 需要检查中断对所有控制系统状态的影响。

② 部分变更程序时,也需要履行上述这样详细的检查。

如果系统比较大,执行上述工作就变得困难了,这会成为影响系统可靠性的主要原因,而信息流的单向性的好处就在于事前可以预测系统发生意外的状态。如果进而做到各控制系统之间的接口条件共享,那么

① 即使一个控制系统发生改变,也不必改变其他控制系统。

② 能为后面介绍的开放式系统和计算机(PC)化打下基础。

3. 例外处理系统的嵌入

如果按照图 3.1 编写控制程序,会遇到以下问题:

① 各个控制分系统中控制周期长短不同。

② 例外现象的发现和早期处置。

③ 异常处理的发现和紧急处理。

图 3.3 表明,回路信息处理型分层递阶系统应该如何在控制信息的传递流程方面处理上述问题。它们应该满足以下条件:

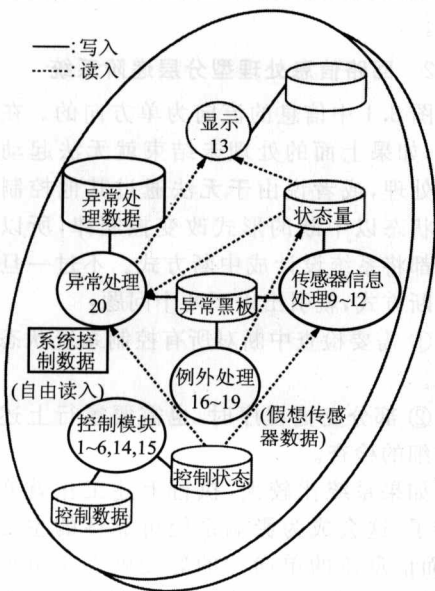
① 各个控制分系统的控制周期与其他控制分系统无关,只能从维持该控制分系统功能的观点出发确定控制周期。

② 各个控制分系统在处理初期应该访问邻近的分系统,以便读取必需的输入数据。

③ 在处理后期应将输出数据送入输出缓冲区(内存),等待邻近分系统的访问。

④ 类似地,将供例外信息处理检测的数据写入例外处理的黑板(内存)中。

⑤ 在例外处理系统中,控制周期越短的下位系统越有访问例外信息处理黑板的优先权。



图中的数字与图 3.1 中的一样

图 3.3 控制系统的信息流程

⑥ 一旦发生例外,应该能够优先访问那些对例外处理条件所必需的全部输出缓冲区。如果在分层递阶系统中设立公共内存区,对实现上述要求是很有帮助的。启动例外处理将引发中断,由于例外处理是依照控制系统的各层级进行实施的,所以应该从处理时间短的下层开始执行(控制规则切换至例外处理模式)。因此,与通常系统的中断方式相比,该系统简单得多。

3.1.3 工业机器人控制器^[2]

1. 工业机器人的功能

如图 3.4 所示,工业机器人的功能是基于示教(动作顺序)生成轨迹点的序列,并反复再现这些轨迹的点序列。图 3.1 主要由运动规划系统和伺服系统控制器构成。运动规划系统的任务主要是将机器人语言转换成轨迹点的序列,它们多半通过直线或圆弧等简单函数平滑地连接起点和终点。作业规划(顺序)一般由操作者用示教器进行输入,不过在大批量生产中改成离线示教(与 CAD 结合)。示教内容不同,智能遥控系统会发生变化,不过作业规划系统一般都具有机器人语言的插补功能。

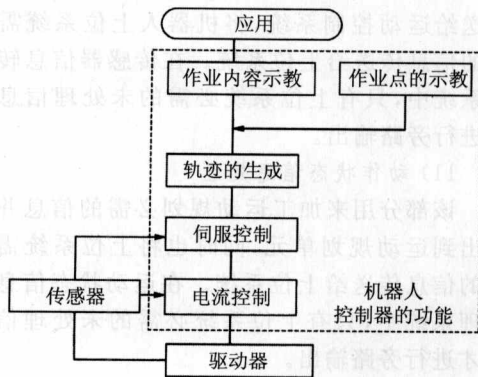


图 3.4 工业机器人的控制功能

2. 工业机器人的硬件组成

图 3.5 给出工业机器人硬件的典型组成。为了通过机构和控制器的优化设计降低工业机器人的成本,一般说来,硬件和软件并不一一对应。例如,多轴集成伺服驱动器以及与之一体化的传感器 I/O 等,对于已有的用途可能非常适合,但是换一个应用场合就未必合适。

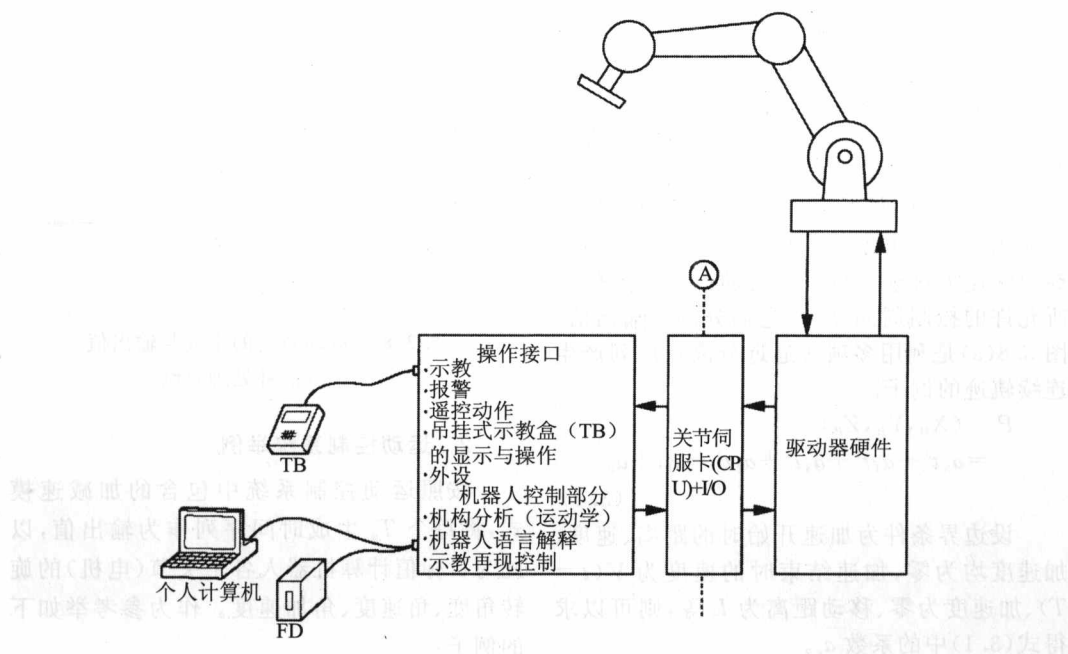


图 3.5 工业机器人控制器的一般组成

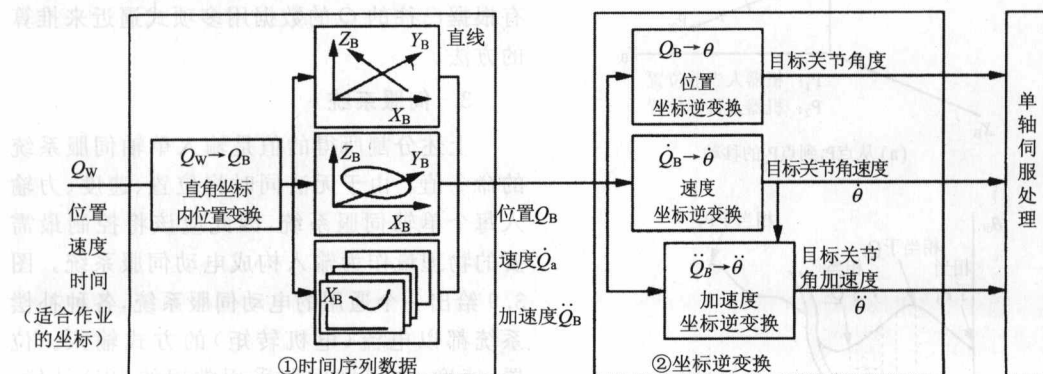
3.2 软伺服

控制仍然是大有补益的。

如果将伺服控制扩展成实现目标值的反馈控制,那么可以把图 3.1 中的机器人控制系统视为一个完整的伺服系统。计算机进一步发展后,大部分控制系统被软件化了,这样就淡化了定义软伺服的必要性。但是,了解一些缩短计算时间的插补方法对高速高精度

3.2.1 运动系统的伺服控制

在图 3.1 中的运动规划和运动控制系统中,多自由度控制是同时处理的,所以单靠硬件完成这个任务有些困难。图 3.6 给出运动规划和控制功能的示意。



Q_w : 在适合作业描述的直角坐标系中表示的位置

Q_b : 在机械坐标系上表示的位置

图 3.6 运动规划与运动控制的功能

1. 运动规划系统举例^[3]

首先需要将作业规划系统中描述的目标值 Q_w 转换成机器人的基准座标(以肩轴为原点的手部坐标等)。一般 Q_w 为轨迹上非常粗略的一系列点,因为没有考虑到运动层面的制约(障碍物等),所以可以借助于机器人的速度模式(图 3.7)或运动规划方法生成基准坐标中的连续轨迹。然后用运动控制系统处理所允许的控制周期 T_s 将它们分割成输出值。图 3.8(a)是利用多项式逼近分离点序列产生连续轨迹的例子。

$$P = (X_B, Y_B, Z_B)$$

$$= a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0$$

(3.1)

设边界条件为加速开始时的距离、速度、加速度均为零,加速结束时的速度为 $V(t=T)$ 、加速度为零、移动距离为 L 等,则可以求得式(3.1)中的系数 a_i 。

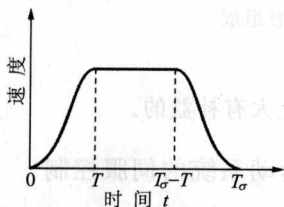


图 3.7 加减速速度模式

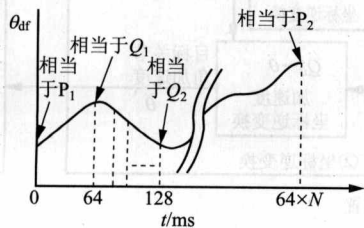
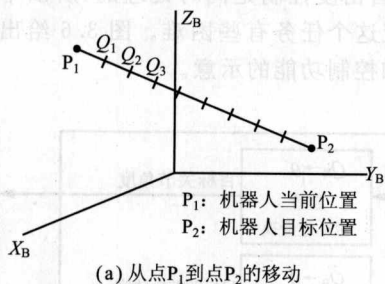


图 3.8 运动轨迹的生成与输出值(插补处理)

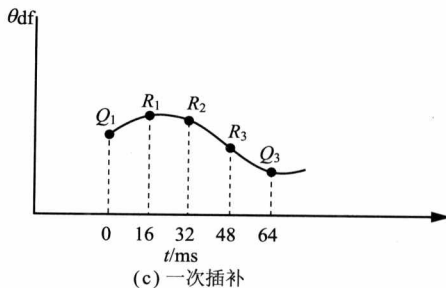


图 3.8 运动轨迹的生成与输出值
(插补处理)(续)

2. 运动控制系统举例

按照运动控制系统中包含的加减速模式,将每个 T_s 生成时间序列作为输出值,以此为目标值计算机器人各个关节(电机)的旋转角度、角速度、角加速度。作为参考举如下的例子:

机器人机构的固有频率为 $1 \sim 50\text{Hz}$ (周期为 $20 \sim 1000\text{ms}$),于是可以将控制周期 T_s 设为固有频率的 $1/10$,即 $2 \sim 100\text{ms}$ 作为大致目标开展设计(这样做风险较低)。如果在此周期内难以完成运动控制系统的计算,那么可以改在可能的周期内进行,然后向伺服系统输出插补值(图 3.8(b)和(c))。分割运动控制系统输出的点 Q_1 和 Q_2 之间的连线,并将结果作为电机伺服系统的命令值。此时,一般将 $Q_1 \sim Q_2$ 之间的连线近似成直线,不过也有根据已往的 Q 的数据用多项式逼近来推算的方法。

3. 伺服系统

上述分割所得的值是输入单轴伺服系统的命令值。由于无法同时将位置、速度、力输入每个单轴伺服系统,因此应该将控制最需要的物理量作为输入构成电动伺服系统。图 3.9 给出一个通用的电动伺服系统,各种补偿系统都以电流(电机转矩)的方式输入。位置、速度、加速度回路采用常用的 PID 补偿。在电流控制系统中反馈用的电流传感器是不可缺少的硬件,因此大多数电流控制系统采用专用微处理器。

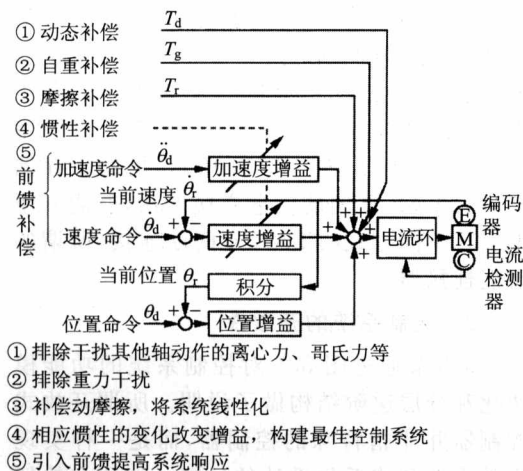


图 3.9 通用电机软伺服控制系统

3.2.2 伺服驱动器(放大器)的应用

如上所述,虽然从运动系统到电机控制均可以采用软件,不过在电机系统的实际控制方面仍有不少经验和技巧,现在市场上已经有许多优质伺服驱动器在销售,用户将其买来直接进行使用即可。近年来,基于单片机或 ASIC 的伺服驱动器已经可以做到全软件化,而且能任意输入位置、速度和转矩。驱动器和电机的一体化促进了电机伺服系统的分离和智能化。这样一来,用户只需专注于运动系统控制的设计就可以了。图 3.10 给出与图 3.9 驱动器相应的连接方式,图 3.11 给出功放一体化电机的产品实例^[4,5]。

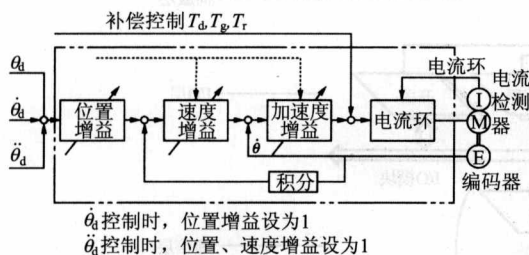


图 3.10 伺服驱动器的应用举例

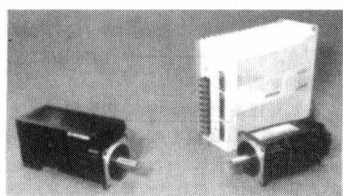


图 3.11 功率放大一体化电机

3.3 开放式控制器

3.3.1 开放性的现状

谈到系统开放性的问题,必须讨论开放的程度。的确,开放式系统对提高控制器设计的效率是极具魅力的。开放性与标准化既有相同的意义,也有利害关系的对立,有时是难以两全的。今后的机器人会更加复杂,因此在本小节我们将介绍一些开放式控制器的设计方法,以便对减轻智能部分的设计工作,提高设计效率有所帮助。

3.3.2 机器人分层递阶结构与开放式控制器的开放性

如图 3.12 所示,人们希望向那些需要作业经验和技巧的领域拓展机器人的研发。但是,要求设计人员掌握方方面面的设计经验,从零开始研发机器人,显然需要花费大量的劳动。为了解决这个问题,如果能让机器人控制器具有如下特点:

- ① 控制器由各种“功能模块”构成。
- ② 各种功能模块之间的接口规格采用开
理念。
- ③ 接口规格标准化。

则不但各种功能模块的方便程度大大得到改善,而且有利于不大熟悉系统集成设计人员也能较为方便地构建一个机器人系统。现有以下几种开展模块化的方法:

- ① 以功能进行划分,实现基于功能的模块化和开放性。

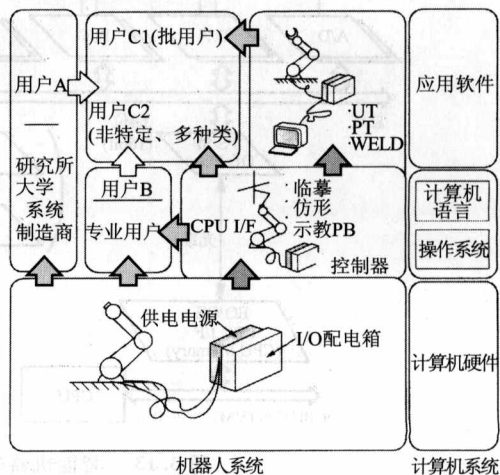


图 3.12 智能机器人的分层递阶系统

② 以软件结构进行划分,实现基于软件的模块化和开放性。

③ 从设备安装的角度进行划分,实现基于装置的模块化和开放性。

也就是说,虽然上述划分方法有互补关系,但是在处理开放性的过程中,它们可以独立开展。例如,控制器结构越朝软件化方向发展,软件标准的开放性越有重要的意义。但是,为了仅使用模块化软件来搭建控制器,必须全部用标准功能模块和分散模块来搭建系统,以便确保实时性^[6]。

3.3.3 开放式接口举例^[7]

1. 伺服系统的 I/O 接口

图 3.13 给出通用功能的接口方式。它的优点是可以灵活地应对不同数量的传感器,实现各种电路板卡的通用化。

2. 节省配线与开放性

进一步改进图 3.13,让所有的接口串行

化,就能简化设备之间的连接,使一向令人头疼的配线问题得到缓解。进而,如果将接口的物理条件或协议标准化,那么接口的利用价值就会大幅度提高。目前,基本上仅采用 LAN 方式,但若按图 3.14 所示,借助于存储器进行 LAN 之间的信息交换的话,就能方便地实现不同方式的 LAN 之间的连接(所谓的智能连接器)。

3. 控制系统的开放性

3.3 节通过图 3.1 对控制系统的功能模块化和分层递阶结构做了说明。所谓开放式控制器并非指特殊的控制器,而是一种实现高效设计和体系化设计的目标。如同在软伺服小节中解释的那样,就运动系统以下的分控制系统而言,如果使用力学参数,那么通用接口将会适合很多领域的应用。问题是尚无法预见系统上位层级之间接口的形式(图 3.2)。显然,设计者必须去发掘自己的解决方式。

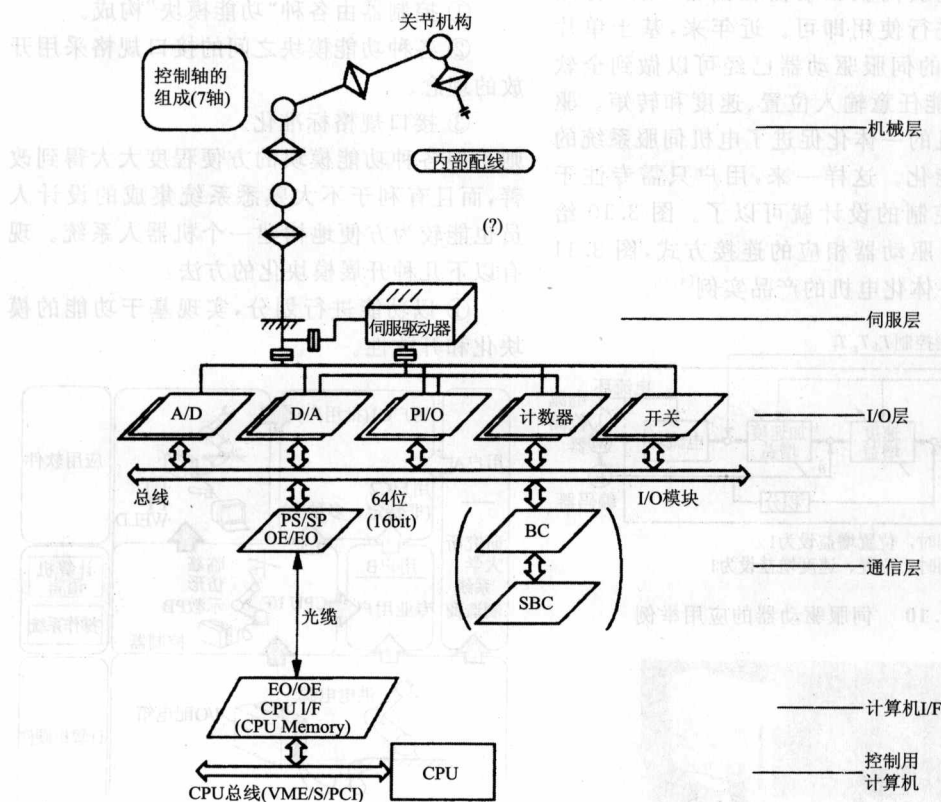


图 3.13 智能机器人系统的分层递阶结构

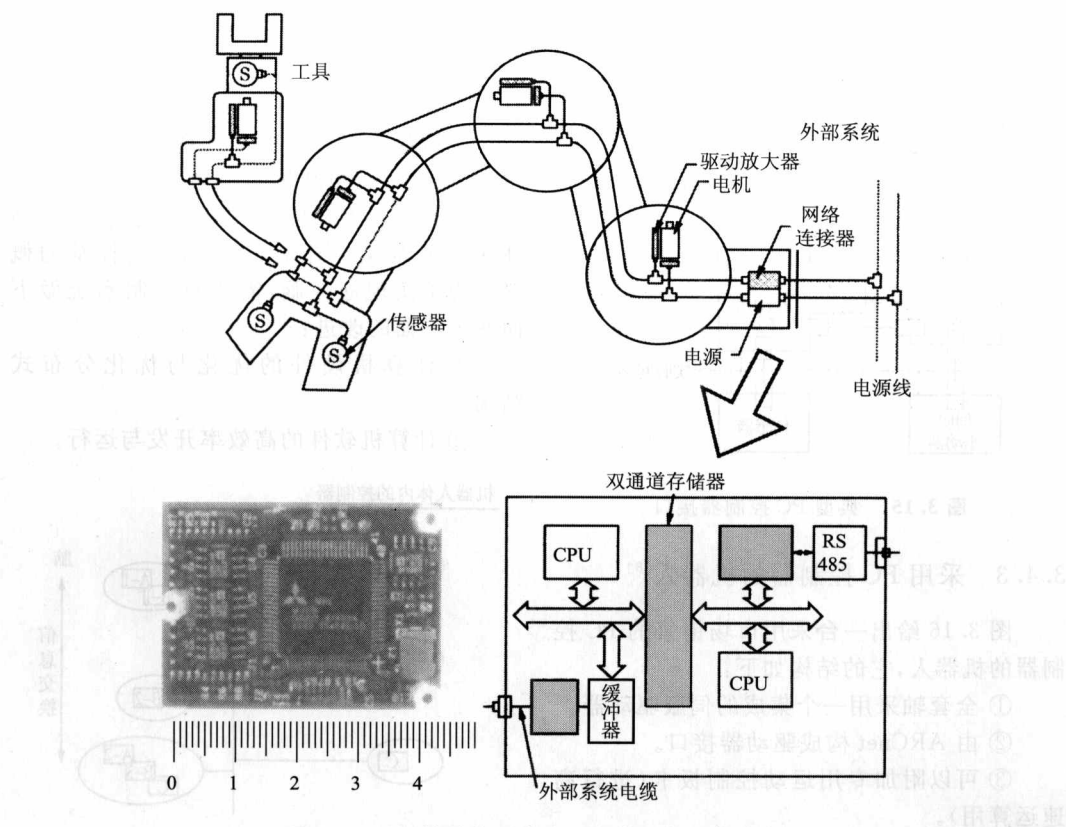


图 3.14 机械手的开放式 I/O 接口与配线节省

3.4 PC 控制器

3.4.1 PC 控制器的结构

若将 PC 控制器视为控制系统的 PC 机化 (图 3.1), 那么用 PC 控制器进行新的设计可以归结为 PC 机之间接口的硬软件设计, 亦即在网络环境中用多台 PC 机与图 3.1 的控制系统对应, 以实现对大多数机器人的控制。此时通过让不同的 PC 机分别对应一个或相关的多个控制系统, 引进了开放式控制器的构想, 那么实际上开放性就等同于 PC 化的设计问题了。这样的 PC 控制器能最大程度地发挥 PC 机的特长, 它具有以下特征:

- ① 系统容易构建。
- ② 系统容易扩展。
- ③ 可以借助于通用工具开发系统。
- ④ 价格便宜。

因此, 当遇到下述情况时就可以考虑采用 PC 控制器:

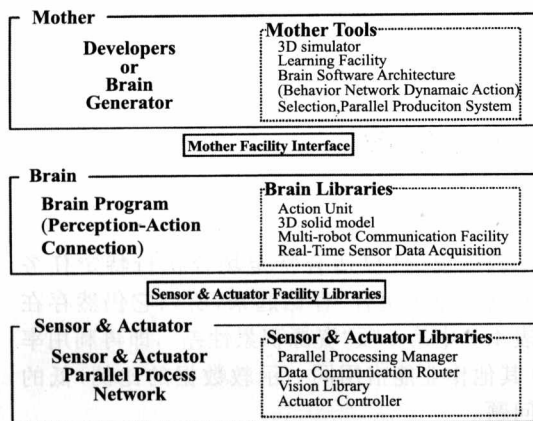
① 使用目的的多样性, 为控制系统进一步升级提供可能。

② 处于开发阶段的小批量产品研发 (包含控制器)。

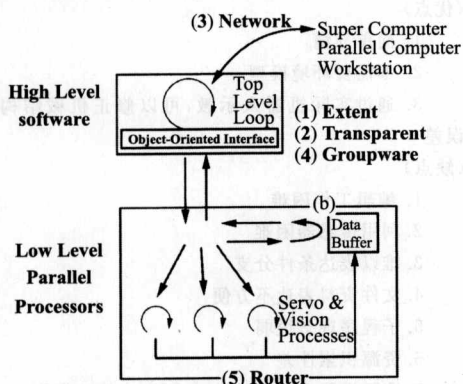
3.4.2 PC 控制器的接口

设计 PC 控制器接口要特别注意通信速度的问题, 应该在各个 PC 机所能确保的控制周期内大幅度缩短通信时间。当前, PC 控制器设计时应该注意以下几点:

- ① 选择专用伺服驱动器和专用接口。
- ② 在传感器接口 (包括传感器 I/O 系统、专用接口驱动器) 方面, 一般优先考虑通信速度较快的并行连接。但是, 图 3.15 给出的实时网络方式有实用的空间, 因为它能节省配线。
- ③ 在实时性较差的上位控制系统 PC 机中, 使用通用 PC 网络可以减少软件开发人力。
- ④ 压缩接口用的数据。



(a) 系统概念



(b) 层级间的非同步接口

图 3.18 遥控脑的例子

大道武生

参考文献

第3章 机器人控制器

[1] 大道武生, 川内直人, 大西献: 産業用ロボットコン

トローラの動向, 自動化技術, Vol.30, No.1 (1998) pp.19-23

[2] 日本ロボット工業会: 産業用ロボットハンドブック (2001)

[3] 日本ロボット学会: ソフトウェアサーボの実現, ロボット工学ハンドブック (旧版), コロナ社 (1990) pp.532-536

[4] Takeo Oomichi, Shigetoshi Shiotani and Reizo Miyauchi: The Design a Serial Communication Link for Built in Servo Driver and Sensors in a Robot, Proc.of the 8th International Symposium of Robotics Research, Springer (1998) pp.185-194

[5] 川内直人, 宮内礼三, 大西献, 大道武生: ロボット機体内省配線システム, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演予講集 (2001) pp.78-80

[6] 平成14年度重点分野研究開発委託費 (21世紀ロボットチャレンジプログラム) 「ロボット機能発現のために必用な要素技術開発事業」(RTオープンシステムアーキテクチャと普及システムの調査研究) 成果報告書, (社) 日本ロボット工業会 (2003.3)

[7] Takeo Oomichi, Tomoyoshi Ibe and Taku Sasaki: Hardware Design Methods and Proposals for Open System Architecture of Intelligent Robot, The 7th International Symposium of Robotics Research, Springer (1996) pp.626-633

[8] 大西献: 可搬式汎用知能アーム登場, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8 (1994) pp.1137-1142

[9] 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博充: リモートブレイン方式によるソフトウェアプラットフォームの構造化と実現, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997) pp.550-555

[10] M. Inaba: Remote-Brained Robotics Interfacing AI with Real World Behaviors, In Robotics Research the 6th International Symposium, International Foundation for Robotics Research (1993) pp.335-344

[11] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, K. Takeda and H. Inoue: Vision-Based Adaptive and Interactive Behaviors in Mechanical Animals Using the Remote-Brained Approach, Proc.of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1994) pp.933-940

第4章 机器人编程

机器人本应该能够自主运动,不过现阶段机器人还没有达到这个水平。为了让机器人能按人的意图进行运动,必须预先设计好机器人的动作大小和动作顺序。这与计算机编程的概念是完全一样的,因此可以考虑采用程序语言来描述机器人的动作。在机器人技术中称这种形式的语言为机器人语言(robot language)。另外,可以采用多通道记录仪预先记录下机器人各个关节运动的角度,然后让机器人以再现(play back)的方式实现期望的运动,这与人们用录音机重放先前录入的音乐与声音的道理一样。这种方式在机器人技术中被称为示教再现方式(teaching playback)。有关机器人示教再现方式的详细介绍请参见第5篇1.2节。

通过直接操作机器人的运动对它(广义的)进行示教,称为在线编程(on-line programming)。通过非直接操作机器人运动对它进行示教,称为离线编程(off-line programming)。后者一般采用机器人语言和CAD技术。

示教再现方式、机器人语言编程方式两种方式比较的结果如表4.1所示。实施焊接作业时,在同一程序下焊接的产品批量不大,应该将机器人语言编程和传感器反馈方式结合起来应用。不过,很多工业机器人都被用于重复作业的场合,所以示教再现方式从引入工业机器人初期至今长盛不衰。初期的示教再现方式完全与录音机的重放方式一样,机器人原封不动地按照示教程序反复进行动作。后来,示教再现方式开始与现代机器人语言编程方式一样,引入了插补功能和编辑功能。两者的区别在于,机器人语言编程方式偏重于程序的文件化和机器人动作的符号描述,而示教再现方式偏重于以数值形式连续记录机器人动作的顺序和条件。因此,虽然示教再现方式有了长足的进步,但是仍无法彻底解决表4.1中所列举的缺点。特别是

示教被视为“仅适合特定场合执行特定任务的动作命令组合”存储起来,所以它仍然存在表4.1中第6项“资源积累性差”,即再利用率(其他作业能借用同一示教数据的比例)低的问题。

表4.1 示教再现方式的优缺点

(优点)

1. 简单易懂
2. 不需要环境模型
3. 通过实际机器人示教,可以修正机械结构的误差

(缺点)

1. 编辑工作困难
2. 利用传感器困难
3. 难以表达条件分支
4. 文件资料表达不方便
5. 子程序观念很弱
6. 资源积累性差
7. 实际机器人进行示教时,需要占用机器人

4.1 机器人编程的种类与特点

4.1.1 机器人编程

什么是机器人编程?它在让机器人运动的所有方法中属于可读方式。日本工业标准(JIS)从广义的角度对示教进行了定义,称程序即是“一种记录向机器人下达的期望执行作业的顺序的形式”^[1]。机器人语言就是为方便实现这种描述形式而开发的程序语言。所谓机器人控制,无论是机械手还是双足机器人,最终都可以归结为对关节角度(或速度、力矩)变化的控制。于是,各种在采样间隔内自动生成机器人关节角度的命令方法受到人们的关注。机器人语言,即“以人们容易理解的形式把向机器人下达期望作业或动作的命令记述成用软件输入的形式语言”。顺便指出,JIS中的“机器人语言”被定义成“人和机器人之间记录或交换信息所用的语言”。

使机器人完成指定动作所必需的信息大致可以分为如下三种:

- ① 动作顺序信息。
- ② 环境信息。
- ③ 机器人结构信息。

可以按照这些信息是通过现场实测的,或者是存储在计算机内供调用的等特征,对机器人动作命令的下达方式进行分类。实际上除了使用实际机器人实际作业的示教再现方式、借助于计算机内部模型计算所有机器人动作的 CAD/CAM 方式之外,还有其他多种介于两者之间的方式。

正如后面将要叙述的,描述动作的机器人语言与一般通用算法语言或系统描述语言(即所谓的形式语言)具有几乎同样的语法结构。机器人语言具有的特点源于机器人语言系统所追求的以下四种特性:

- ① 实时运行系统。
- ② 三维空间动作系统。
- ③ 人机界面。
- ④ 完成实际运动的系统。

也就是说,这个系统必须能够实时(采样周期为 0.1~10ms)处理三维空间的物理变化(如位置、姿态等)。人机界面更强化了这些功能,操作者只要在作业现场操作示教盒就能驱动机器人进行动作,因此机器人语言系统必须好用。

综上所述,依据下述观点可以对机器人语言进行既简单又明了的分类:

- ① 有无实时/并行处理功能。
- ② 有无几何模型。
- ③ 智能处理的水平以及语法结构。
- ④ 有无人机交互操作功能。
- ⑤ 能否将在线示教和离线编程整合起来。

本节主要介绍与环境模型计算无关的动作描述型机器人语言,重点讲解语言的智能处理和语法结构。

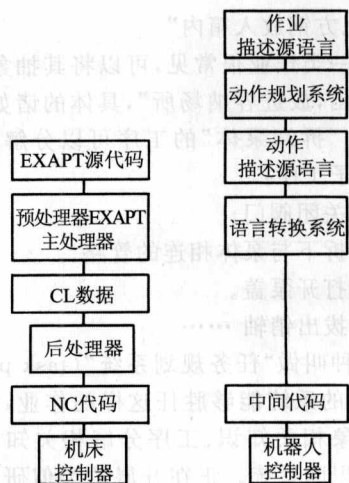
4.1.2 机器人语言的处理流程

通用算法语言有编译型语言和解释程序型语言的区分。前者用编译器将源代码转换成计算机的本机代码(native code),以文件形式存储起来,然后在计算机上运行。FORTRAN、PASCAL 等就属于这类语言的典型例子。后者在实际运行的计算机中直接解释源代码并运行,BASIC 语言就是其中的代表。

介于两者中间还有一种对中间代码的解释程序型语言。这种语言一旦把源代码转换成中间代码,它就可以在计算机上由解释程序器边进行解释边运行。JAVA 语言就是典型的例子,它适合在不同的计算机上运行同样的源代码。数控机床和机器人语言采用中间代码运行解释程序器已经有很长的历史了。

与机器人一样,在数控机床控制语言中有程控装置用的顺控程序语言、数控机床用的程序语言两种。后者的处理流程框图如图 4.1(a)所示。图 4.1(a)中有三种文件格式:零件程序(APT 或 EXAPT 源程序)、刀具位置信息(刀具定位数据(cutter location data)或 CLDARTA)和数控代码(NC 代码)。零件程序描述零件的形状并将其输入系统,系统自动决定移动路径,选择加工条件,然后输出 NC 代码。NC 代码是向数控机床控制器下达的加工命令,用于各轴的位置控制、冷却液管的开关等。在生产现场就是通过读这种 NC 代码来理解机床的动作。但是,CNC 机床已经把三者结合在一起了,只要在显示屏的画面上设定几个点,刀具的移动路径、加工条件等均能自动完成,然后将数据自动下载到机床伺服系统中,执行对数控机床的驱动。出现三种类型的分层数据是有历史原因的,因为当时计算机的计算能力不够,不得不进行分割处理。

机器人语言系统的处理流程如图 4.1(b)



(a) 数控机床程序语言系统 (b) 机器人程序语言系统

图 4.1 控制语言系统的处理流程

所示,大致可以分为规划系统和执行系统。所谓规划系统,就是从零部件的形状和加工环境的信息,计算机器人动作顺序和运动轨迹的系统。但是,规划系统是基于模型的系统,它的计算建立在计算机内部构筑的模型之上,因此它只适用于能够建立模型的领域。

机器人语言借助于数据和符号对动作进行编程后还需要在实际机器人上或仿真器上对生成的动作命令进行确认。因此,它追求的不是批处理作业,而是即时解释和执行命令的人机交互式系统。因此,执行系统一般都带有动作命令解释执行系统(interpreter)。目前,自带机器人语言的机器人大都采用单独的“交钥匙”系统(stand alone turnkey system),低层级的规划系统和执行系统均在一起。

4.1.3 机器人语言的智能处理级

下面考察图 4.2 所示的机器人作业。

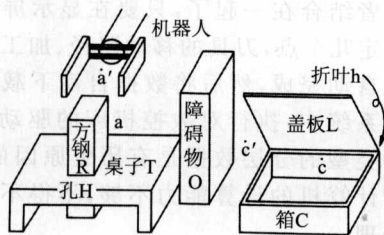


图 4.2 机器人作业举例：“把方钢放入箱内”

“把方钢放入箱内” (I)

这一类作业很常见,可以将其抽象成“把零件拔出,放进容纳场所”,具体的诸如“拆卸泵体”。“拆卸泵体”的工序可以分解成如下若干个子工序:

- ① 关闭阀门。
- ② 拆下与泵体相连的管路。
- ③ 打开泵盖。
- ④ 拔出销轴 ……

一种叫做“任务规划系统”(task planning system)的系统能够胜任这样的作业,它是由作业对象相关知识、工序分解相关知识等组成的知识库系统。正在开展的类似研究有很多,例如,研究在喷漆、焊接等作业中按照作业规范自动生成机器人的动作。“把方钢插入孔中”只不过是子工序中的一个动作。下

面用日常会话语言代替形式语言对该作业的分解步骤做一个描述:

- ①' 打开箱 C 上的盖板 L。
- ②' 把方钢 R 从孔 H 中拔出。
- ③' [避开障碍物 O], 把方钢 R 放入箱 C 中。
- ④' 关闭箱 C 的盖板 L。

在上面, [] 中的内容表示无需说明的意思。显然,描述(II)要比描述(I)更为详细,但即使如此仍然不能准确地指明动作的顺序和运动的轨迹。下面对描述(II)的③'项动作做更详细一些的描述:

- a. [机器人]在点 a 抓取方钢 R。
- b. 方钢 R 经由中间点移动到目标点 c。
- c. [机器人]脱离方钢 R。

其中,中间点的位置可以从作业环境内的桌子 T、障碍物 O、箱子 C 等的位置,再根据避障算法计算得到。反过来说,为了从描述(II)的③'项推导出(III)来需要靠下列算法:

- 抓取点的自动选择。
- 冲突检查和障碍回避。
- 最佳路径的选择。

(III)中的 a. 项、c. 项规定了机器人和被处理对象之间的位置关系,而 b. 项描述了对对象的运动。也就是说,(III)不仅直接描述了机器人的动作,也描述了对对象的动作。这样的表现形式被称为[对象级(object level)描述]^[3]。如果直接描述机器人的动作,(III)将发生下列变化:

- (a') [机器人]向点 a' 移动,合拢手部。
- (b') [机器人]经由中间点向目标点 c' 移动。
- (c') [机器人]手部张开。

方括号 [] 中的内容表示既是作业任务的执行者,又是作业命令的接受者,一般可以不用明确地标示出来。需要指出的是,描述(III)和描述(IV)中抓取点和中间点是有区别的。(IV)这种形式的描述被称为(执行器级(effector level)的描述)。

不同的描述方法反映机器人语言系统所具有的智能处理级别。表 4.2 列出了机器人语言级别的分类,在 20 世纪 70 年代至 80 年代之间,对机器人语言与人工智能之间的关

系有过很多的讨论。根据表左侧的 Lozano-Pérez 的定义,可以把描述方法大致分成如下两类:

- ① [不用语言的方法]。
- ② [借助于某种形式语言的方法]。

在第②种利用语言的方法中又可以分成以下两类:A.[意识到机器人存在的方法],即机器人级编程(robot-level programming);B.[描述执行作业任务的方法],即任务级编程(task-level programming)。

现有的机器人语言都属于①类的机器人级编程语言,它也被称为动作描述(motion description)。与此相应的,属于②类的任务级编程语言则被称为任务描述(task description)。归入这类语言的代表有 AUTOPASS、RAPT、COSMOS 等,人们过去曾对它们开展过少量的研究,现在研究已经基本上处于停滞状态。

表 4.2 机器人语言级别的分类

(a) Lozano-Pérez 的分类	(b) Bonner 的分类	(c) 井上的分类
task-level programming	task oriented level	任务目标级 对象状态级
robot-level programming	structured programming level primitive motion level point-to-point level microcomputer level	结构动作级 基本动作级 指令级
guiding-level programming		

我们知道,每一种通用的程序语言,如 C、BASIC、JAVA 等在语法和功能方面都有不同之处。同样地,各种机器人语言对相同动作的描述也会呈现出相当程度的区别。因此,需要从机器人语言程序的编程效率、可维护性、可读性、用户技术水平等多方面进行综合考虑,做出对机器人语言的适当选择。

近十多年来,工业机器人语言在形式上没有呈现出显著的进展。不过在其他方面,如推进系统的开放性和网络化方面、改善仿真器的通用性和增加内部冲突校验方面、提高机器人用软件系统的整体方便性方面等都呈现出明显的改观。

4.2 机器人语言的功能

本节将以工业机械手语言为中心,对机器人语言的功能进行介绍。

4.2.1 机器人语言对机器人动作的控制

这里我们来说明一下在描述机器人动作方面,如何使用机器人语言处理流程的问题。与数控机床一样,机器人有两种控制路径的方式^[1]:

① CP 控制(Continuous Path control,连续路径控制,对给定的机器人全部路径的控制)。

② PTP 控制(Point-To-Point Control,点对点控制,对给定的机器人运动路径上的有限个经由点的控制)。

典型的 CP 控制,如对喷漆作业和弧焊作业机器人的控制,典型的 PTP 控制,如对点焊作业和装配作业机器人的控制。在机器人关节角坐标系中的直线插补,虽然是一种在时间上使全部关节轴同时开始和同时结束的控制,但由于机器人的运动轨迹会因轨迹的起点和终点位置的不同而不同,所以也称其为 PTP 控制(在数控机床的日本工业标准 JIS 中,未对 PTP 控制时所有轴都必须同时控制做出规定,故可以设想对 6 根轴逐一顺序的运动进行控制)。在 CP 控制方式中,实际上还包括一种所谓的“伪 CP 控制”,它把 PTP 控制中的插补点间隔取得很小,从而生成近似连续的曲线。

以图 4.3 动作为代表的指令的一般形式为 MOVE PT₁, VEL₁,

它们表示从当前位置点 PT₀ 移动到目标位置点 PT₁ 的动作指令。其中,PT₁ 是目标位置点的数据,VEL₁ 是移动的平均速度(或者是最高速度,因机器人系统的加减速方式的不同而异)。

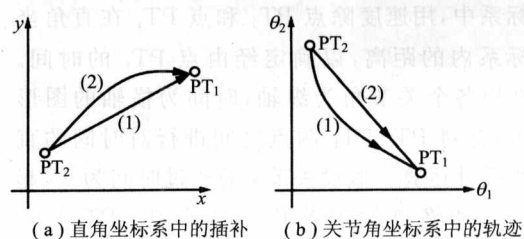


图 4.3 机器人动作指令的执行实例

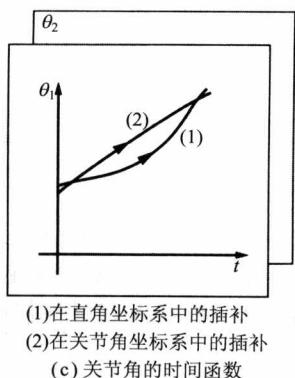


图 4.3 机器人动作指令的执行实例(续)

速度指令也有两种表述方法,在上例中给出的属于[与动作指令结合的方式],还有一种方式称为[与动作指令分离的方式],在这种方式中,一旦给定速度指令,在没有变更指令前一直保持相同的速度(例如,SLIM 的 SPEED,JSPEED)^[2]。通常采用后一种方式。图 4.4 给出机器人运动轨迹的实现方式,它是按照作业坐标系到关节角坐标系的变换(逆运动学)和指定点插补的前后关系进行分类的。

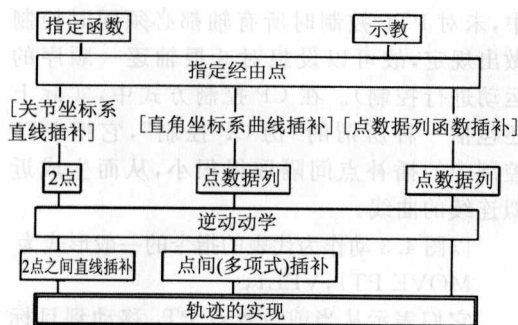


图 4.4 机器人运动轨迹的实现

1. 关节角直线插补

首先将点 PT_0 和点 PT_1 变换到关节角坐标系中,用速度除点 PT_0 和点 PT_1 在直角坐标系内的距离,以确定经由点 PT_1 的时间。在以各个关节角为纵轴,时间为横轴的图形上,针对 PT_0 - PT_1 两点之间进行对时间的直线插补运算。假设关节 i 的通过时间为 T ,起始点和终点的关节角分别为 $\theta_i[PT_0]$ 、 $\theta_i[PT_1]$,那么在关节角坐标系内的直线插补运算公式为

$$\theta_i\left(\frac{t}{T}\right) = \theta_i[PT_0] + \frac{t}{T}(\theta_i[PT_1] - \theta_i[PT_0])$$

式中, $\theta_i[PT]$ 为在 PT 点的关节角 θ_i 。

2. 直角坐标系直线插补

首先求得通过时间 T ,然后在直角坐标系内针对点 PT_0 和点 PT_1 之间进行插补运算,运算公式为

$$P\left(\frac{t}{T}\right) = PT_0 + \frac{t}{T}(PT_1 - PT_0)$$

再选择适当的点数进行逆运动学变换,

得到 $\theta_i\left(\frac{t}{T}\right)$ ($j = 1, 2, \dots, k$)。在大多数情况下,选择位置指令指定的时间间隔来分隔点数。可以直接地将相应关节角 $\theta_i\left(\frac{t}{T}\right)$ 直接进行直线插补,必要时允许在关节角坐标系内再次做直线插补运算,然后向伺服系统输出命令。

3. 直角坐标系圆弧插补

这是标明曲线函数关系的插补方式。几何学确定圆弧有多种方法,例如,指定圆心和圆周上的一点及其方向,指定两个圆周点和圆的内侧,指定三个圆周点等。根据这些方法可以在直角坐标系内定义圆的方程式。与前述在直角坐标系上插补的方式相同,在圆周上以适当的间隔进行逆运动学变换,得到 $\theta_i\left(\frac{t}{T}\right)$ ($j = 1, 2, \dots, k$)。后面的步骤与直角坐标系内的插补方式一样。

现有的工业机器人一般都采用带有大减速比减速器的直流电机,通过对各个轴单独的位置控制实现期望的运动控制。但是如果面对直接驱动机器人,由于系统容易受到动态力、负载变动、姿态变动等诸多因素的影响,运动控制需要采用具有动力学补偿功能的伺服系统。不过,伺服系统实现位置指令的方法不在本章的讨论范围之内,故从略。

4.2.2 机器人语言的命令集

机器人语言的命令集大致有表 4.3 所列的 8 种。除机器人动作命令外,其与 BASIC、FORTRAN、PASCAL 等通用程序语言的差别不大。所谓机器人语言,也可以定义为“在描述机器人动作的基础上附加适当数据结构

和动作命令的通用程序语言”。不同机器人语言的功能各不相同,但直至20世纪80年代后期为止确立的大多数工业机器人语言却具有共同的功能。这些共同的功能被纳入日本工业标准(JIS)的标准语言SLIM和STROLIC之中。本节将针对这些功能,介绍它们的描述方法。

表 4.3 机器人语言的命令集

A. 移动插补功能
B. 环境定义功能
C. 数据结构和运算功能
D. 程序控制功能
E. 数值运算功能
F. 输入输出和中断功能
G. 文件管理功能
H. 其他功能

1. 移动插补功能

移动插补功能是机器人语言所特有的,大致可以分成如下几种:

- ① 速度设定(JSPEED, SPEED)。
- ② 路径插补(JMOVE, LMOVE, VMOVE, CMOVE, CMOVE3, ATRAN, ITRAN)。
- ③ 动作定时(PAUSE, DELAY)。
- ④ 定位精度(COARSE, FINE)。
- ⑤ 手部控制(OPEN, CLOSE)。

其中, JMOVE 是在关节角坐标系中的直接插补指令, LMOVE 是在作业坐标系(通常为三维直角坐标系)中的直接插补指令。在 AL 语言中^[4], 通过 with 语句可以对力控制和沿着轴的控制进行描述, 不过这种功能应用的例子很少。

2. 环境定义功能

与数控机床的 NC 语言一样, 机器人语言中的主要运算就是环境数据之间的运算, 但是由于现代机器人语言是以基本动作级的实时系统为核心的, 所以环境定义功能和环境定义运算功能均不太完备。在机器人语言中, 只是在位置姿态数据冠名和语言编辑功能的基础上增加了直线和圆弧的动作命令, 而由点、线、面、体等形状元素组成的分层递阶结构, 即所谓的几何模型的概念尚未形成。

3. 数据结构及其运算功能

一般说来, 通用的数据结构有字符串和数组(最多为二维)。机器人语言应该增加专

用数据结构, 通常如坐标变换矩阵、三维向量、点数据(位置和姿态)、点数据列等。向量的运算包含加减(++, --)、内外积(SPRD, VPRD)等。

4. 程序控制功能

在面向顺序处理的通用程序语言中, 为了能够选择下一步处理, 或者执行反复处理, 特意设计了程序控制语句。但是在生产现场常用的指令级语言中, 只需要采用基本汇编语句、同样的 GOTO 语句、计数器控制语句等即可控制程序流程。在现有的机器人语言中, 多数具有主程序和子程序, 能对过程、子程序等进行说明。

5. 数值运算功能

与通用程序语言相比, 机器人语言的数值运算功能和 BASIC 语言几乎具有同等水平。不过, 机器人语言往往追加一些频繁使用的特殊功能, 反之又去除了一些高级数学运算功能(如对数、阶乘等)。参与运算的数值一般为 2 位整数、4 位整数、4 位实数、8 位实数等, 有时也会在数值上增加 1 位整数的文字或符号位。

6. 输入输出和中断功能

在顺序控制的程序中, 与外部传感器信息的输入输出交互和中断处理是最为重要的功能, 每一种机器人语言都在这方面下了不少工夫。

机器人与周边装置的连接点很多, 因此机器人都具有现成的数字输入输出接口, 连接能力从 16 点到 512 点。机器人一般还备有标准 RS-232C 串行口和以太网接口。虽然中断功能十分必要, 但从实际使用的情况看, 工业机器人通常都按照顺序重复作业, 中断至多能处理子程序的分支和返回, 而且屏蔽性较低。多数工业机器人还设 1~4 点可组态定时器, 一部分工业机器人还有多任务高性能控制器。

7. 文件管理功能

机器人语言应处理的文件包括程序本体和位置姿态数据集。为了使处理机器人语言的计算机能在工厂恶劣的环境下可靠运行, 文件应该尽量简单。许多机器人语言都有程序读出、写入、示教数据集(示教点群)的编辑功能。

8. 其他功能

机器人语言的其他功能还有:

① 工具变换、基本坐标设定和系统的初始化。

② 作业条件(例如,焊接条件)的设置。

③ 图像的处理。

④ 力传感器的管理等。

这些功能虽然很重要,但不同机器人语言的表示方法和功能结构不尽相同,故本节从略。

4.2.3 动作数据结构

通用编程语言一般都有可供用户自由选用的通用数据结构生成机构和利用机构。反之,机器人语言属于专用语言,所以必要数据的生成利用方法是靠系统事先准备好的。

1. 位置姿态数据

在所有的机器人语言中,作业环境内的位置姿态数据是主要的数据结构。它有以下4种表示方法:

I 坐标变换矩阵。

II 欧拉角与位置向量。

III 手部关节角与位置向量。

IV 关节角。

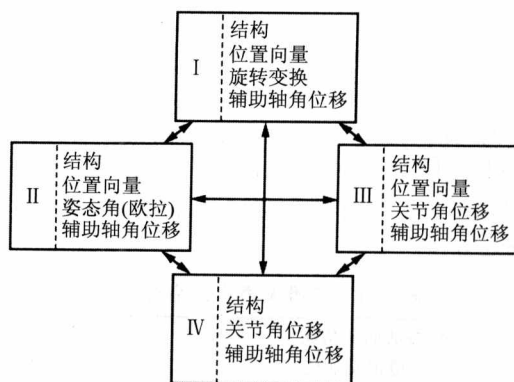
除此之外,描述姿态的数据有旋转角、纵摇角、侧摇角(RPY),或四维数(旋转轴和围绕它的旋转角),不过日本工业机器人协会标准语言 SLIM、STROLIC 中不含四元数。在许多情况下,在上述4种位置姿态数据表示的基础上还可以增加下述三种数据:

① 辅助轴(旋转平台及传送带等)角位移。

② 速度信息。

③ 顺序信息(周边装置的开关信息)。

机器人语言不同,储存的形式也各异。在日本工业机器人协会标准语言 SLIM^[2,3]、STROLIC^[5] 的位置姿态数据结构与机器人示教再现方法和机器人语言的表现方式是对应的,所以可以求出与上述第I项到第IV项所有表现形式等价的变换形式。其中III项用于直至手腕前在位置和手部姿态可解耦的机器人机构上(例如,3轴直角坐标型机器人、水平2自由度机器人)。图4.5表示了这种标准化方案的数据结构。



结构位: 辅助轴数(2位)、结构设定(3位)、数据表现(3位)

图 4.5 位置姿态数据的表达方法
(SLIM 和 STROLIC 的数据结构)

用 I 的坐标变换矩阵计算关节角时,解的结果不唯一。例如,图 4.6 所示的例子中,即使位置姿态相同,依照以下条件共有 8 种可能解:

- 手腕上旋/手腕下旋(flip/non-flip)。
- 右手系统/左手系统。
- 手臂上扬/手臂下垂。

在 I 的坐标变换矩阵中,让上述三种选择分别对应数据结构中的 1 位(bit),就能表现 8 种解所对应的构形。如果存在可以旋转 360°的关节,那么不同旋转角可能实现同一个姿态。此时存在更多组解。

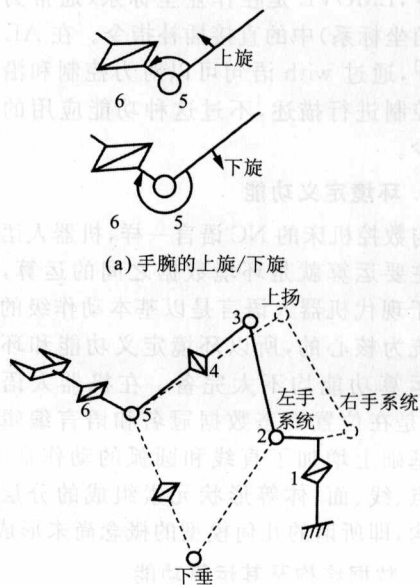


图 4.6 机器人逆运动学中的 8 种解

由此可见,位置姿态数据结构属于一种复杂的记录结构,几乎所有的机器人语言都不允许相互参照或拷贝相关的位置姿态数据,一般只能以点数据为单位,通过示教方式把位置姿态改写成坐标数据。

2. 位置姿态数据数组

为了再现示教的数据,只需将下达目标点指令的时间间隔取得与示教时的位置采样周期相同即可。如果采样周期充分短,那么仅依靠位置指令的控制就能实现速度的平滑变化。但是这样必然会招致示教点数极其庞大,存储容量急剧扩增的后果。例如,以20ms的采样周期持续喷漆作业示教,时间长达1min,这就需要记忆 $1000/20 \times 60 = 3000$ 点。再假设每个示教点需要由10个4 byte的整数表示,于是需要的存储空间将达到 $4 \times 10 \times 3000 = 120\text{kB}$ 。今天对付这样的存储量当然不是什么大问题,但是在20世纪80年代却为计算处理量和价格造成相当大的麻烦。因此,示教再现方式应该存储尽可能少的示教点数组,然后在这些示教点之间采用插补方式。同样的方案也适用于机器人语言的场合,最好把自由曲线定义成位置姿态数据的数组。为了便于实现编辑功能和循环功能,在位置姿态数据数组上还可以想想办法。本节以6自由度机器人为例说明位置姿态数据数组的处理方法。

1) 点数据结构

第 i 个点 P_i 以位置姿态 X_i 、速度 V_i 为一组数据存储(图4.7)。再给定有关属性的作业命令 T_i 和插补方式 I_i 。这里的位置姿态 X_i 就是前述第(1)项的位置姿态数据,不过为了进行彼此区别,特称数组 (X_i, V_i) 为点数据。

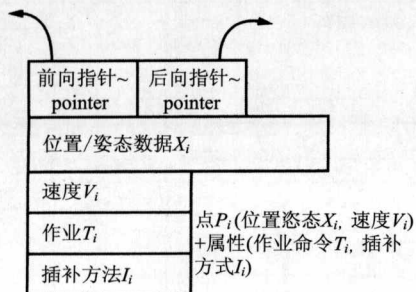


图 4.7 点数据的结构

2) 速度的设定

速度是指机器人末端执行器前端的合成

速度,或者用当前点到目标点所花费的时间表示,它是标量。速度设定方法有以下两种:

① 求出当前点到下一个目标点之间的直线距离,以平均速度确定其间的插补点。

② 让脉冲频率与给定速度成比例。

需要指出的是,当机器人向内回转时,规定末端执行器前端停止在回转中心点不动,仅让姿态发生变化,此时在三维坐标系内给定末端执行器前端的速度是无意义的。在这种情况下,可以改成给定时间,或者设定从回转中心到位于指定距离的点的速度的方法。

3) 作业命令

在机器人语言中,作业命令是被当作输入输出指令处理的。例如,机器人在运动中打开喷枪(图4.8)可以采用以下表述方式:

```
move PT-A
move PT-B
out spray, on
move PT-C
```

其中,move指令表示读取下一条命令的意思。spray, on指令是在move PT-A指令被执行,并在move PT-B运算的第一步结束后被读入和执行的。结果,在经过点PT-A后喷枪立即被打开。

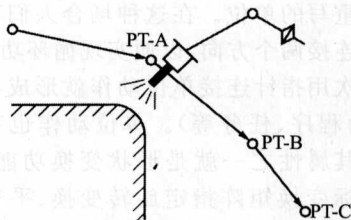


图 4.8 用机器人语言描述作业命令的方法

与此相对应,在点数据数组中作业命令 T_i 被视为点数据的属性,以64位数据结构模式存储起来。其中,各位对应着周边装置的开关状态。例如,在接通焊接电流(相当于外部信号输出)时,若从 P_i 点开始焊接,那么后面相应的数据位应指定接通(on)状态。在等待输入信号时,若某一数据位是1,那么在与之对应的数据位接通之前都应该保持该指令。

4) 插补方式的指定

在机器人语言中,点是以移动插补命令变量的形式给出的,但是在与示教再现方式组合时,插补方式将按照点数据 $P_i(X_i, V_i)$ 的属性,或者点数据数组的属性被指定。在停

留点或到达终点后,不再需要插补时就打上标记。

5) 单位动作与作业的数据结构

这里所示的点数据在记录时与 PASCAL 语言具有相同的数据结构。它们又以连续性数据的方式存储在文件中,不过考虑到插入、删除、增加等编辑的方便,它们采用指针连接,以链表结构的形式构成一个单位动作(图 4.9)。

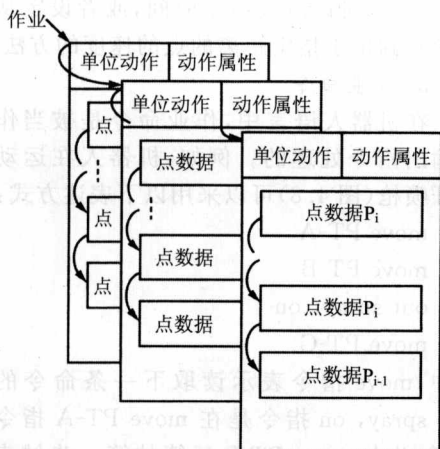


图 4.9 点数据数组的结构

所谓单位动作,是指在编辑时原则上必须全部重写的单位。在这种场合人们有时通过指针连接两个方向,以便实现循环功能。

再次用指针连接单位动作就形成了作业(或称为程序、任务等)。单位动作也有附加属性。其属性之一就是形状变换功能,包括通过坐标变换矩阵指定旋转变换、平行移动变换(镜像变换)、扩大缩小变换等。变换运算在动作执行之前进行,为了适应速度条件、作业条件等不同场合,变换规则应该是事先决定好的。同样地,如果指定传送带的运动,那么传送带的同步功能就能够计算出实际移动的位置。

4.2.4 机器人语言的周边技术

机器人作业的复杂性加大后,在机器人上安装图像处理装置、力传感器的应用实例也跟着多起来。这样一来,在机器人程序的制作任务中,描述周边装置的程序与描述本体动作的程序相比较份量有所增加。于是对程序使用便利性的要求也提高了。随着 PC 机的普及,机器人语言的周边技术在以下三

个目标得到改善:

- ① 可操作性的提高。
- ② 先进技术的简单化。
- ③ 与离线示教方式的融合。

1. 用户接口

我们已经发现这样的应用实例,就是为了便于作业人员理解,机器人控制器与以太网连接起来,并在 PC 机显示器上做成图形界面 GUI,把机器人的基本功能部分和显示部分分离开来(图 4.10)。

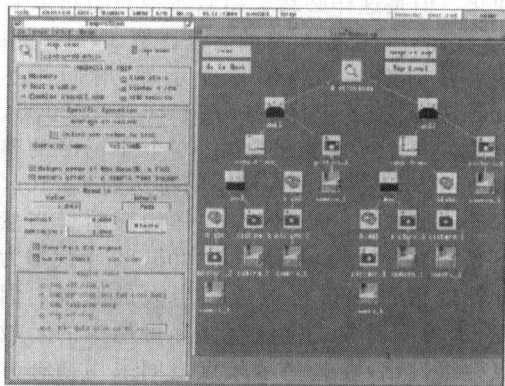


图 4.10 通过图形界面表示机器人运行程序的例子

在 PC 机上用图形安排机器人作业,甚至只需要输入必要的数据机器人就能够按照编辑的程序进行运行。图 4.11 显示出输入数据的窗口。类似地,也配备了供机器人图像处理控制和力控制的接口,甚至可以把很麻烦的标定、数据输入处理方式等都简洁地显示在屏幕界面上,这样既对程序员的编程能力有所补益,也有利于提高软件开发效率。

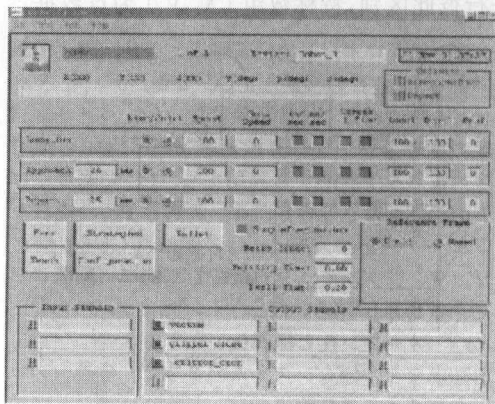


图 4.11 通过图形表示位置数据输入的例子

在机器人技术中,传统的都是通过可编程逻辑控制器(PLC:Program Logic Controller)来控制周边装置,它与机器人控制器还是有区别的。现在,机器人的诸多任务功能被挖掘出来,常常通过机器人语言对周边的作动筒、传感器实施集成控制。反过来,PLC的功能也得到提高,只要接通电机电驱动控制模块,PLC就能直接控制机器人,PLC的扩展软件甚至能实现机器人的位置控制。

由上述可知,现在机器人语言系统被扩展成为“机器人系统综合软件环境”,机器人语言的功能被大幅度得到充实。

2. 功能设定的简洁化

机器人作业的类型很多,工作环境也很复杂,尽管开发人员在子程序的开发上花费了越来越多的劳动,但仍然难以提高软件开发的效率。因此,现在大家在致力于将过去的应用成果汇总成宏命令的形式进行调用。

另外,机器人动态仿真软件的迅速发展,使现在作业时间的估计精度也得到了大大的改善。在仿真器上对机器人进行动作检验,再把它下载到实际机器人上做一些局部微调后提供给现场生产应用,这样的生产方式已经得到普及。其结果是使机器人的开发时间缩短,成本降低。

3. 网络化

近年来,以PC机为核心的网络系统获得了惊人的普及,它跟随因特网的发展也呈现出遍地开花之势。随着制造业全球化的推进,日本企业不仅在本土,还纷纷到美国、东南亚各国开拓制造基地和制造工厂,并通过网络把全世界实时地连接在一起。与此并行的是,在工厂有自动化局域网(FALAN:Factory Automation Local Area Network),在通信方面有以制造自动化协议(MAP:Manufacturing Automation Protocol)为代表的多种网络。由于输入/输出协议的高度标准化,网络卡(以PLC为主)已经可以直接搭载在机器人上,同时通过CC-link或设备网(Device Net)等方式能方便地与控制周边装置的PLC进行连接。伺服网络也已经实用化了,它依据的是PC机周边装置网络标准IEEE1394,通过PC机可以很简便地对机器人实施控制。这样一来,就能把PC机的网络优势和Windows

的GUI优势同时发挥出来,通过简单的连接,机器人就能够处理基于数字摄像机的图像。

4. 开放化与标准化

像汽车生产装配线这样同时运行多台机器人的生产现场很难只选用一种品牌的机器人,在大多数情况下是多种品牌的机器人混线运行。尽管JIS制订了机器人语言的标准,但普及率很低,各个公司的机器人语言之间的互换性很差。机器人运行状态在显示和示教方法方面的差别使问题更是雪上加霜。与标准化的情况相反,大家倒是一致认为如果经由网络对运行实施控制/监视,那么就能按照用户的喜好配备用户接口,从而产生不少便捷之处。于是由PC机直接控制和监视机器人运行的“开放性”得到各机器人制造公司的积极推进,开发了通用的网络接口。现在,各个公司的机器人控制器已经能够通过防火墙连接起来,在机器人存取协议(RAP:Robot Access Protocol)之下实现了以下功能:

- ① 运行管理。
- ② 生产调度。
- ③ 三维监控。
- ④ 程序维护。
- ⑤ 远程维修等功能。

以上详细解释了工业机械手使用的机器人语言。机器人动作的描述语言经历了从固定机械手、移动机器人、宠物机器人、拟人机器人等几个阶段,各自的做法有很大区别。这些区别将在4.3节中予以介绍。

新井氏夫 吉田邦夫

4.3 示教与编程

机器人语言描述的对象基本上是自己的运动。机器人语言系统的功能包括:给定手部的动作,将它变换成各个关节角的时间函数,并指定该动作附带的条件。随着机器人控制自由度的增多、方式的变化、动作形式的多样化,机器人语言也必须扩展描述的功能。

人们过去曾一度只处理6自由度机械手的控制,后来遇到一些冗余自由度机械手,它们的自由度一般不超过8个。拟人机器人和四足机器人问世后,仅与移动相关的自由度就可能高达10~40个。这样的系统已经超过了传统冗余自由度机器人“最优化”控制律

在自由度方面的上限,在实际运行中完全行不通。由此需要采用所谓“运动捕获”(motion capture)的示教方式取而代之。

另外,在传统位置控制的基础上,近来人们又引入了其他控制律,这也导致机器人控制程序内容的巨大变化。仅单轴电机控制而言,就可以举出位置控制、速度控制、力控制、柔顺控制或阻抗控制,如果是多轴组合,还有位置/力混合控制等,甚至在不同方向上可以采用不同的控制律。但是,总体来说,机器人控制仍有许多值得深入探讨的问题。例如,关于力控制目标值和控制参数(力、最大速度等)的设定等问题,在指标的内容方面尚无定论,在指标的量化方面也很难把握(操作者很难主观臆断力、速度等的具体数值)。

本节将阐述上述两种对象的示教和编程方法。

4.3.1 演示示教

拟人机器人或四足步行机器人本身与移动相关的自由度很多,再加上腰部运动也对动态运动控制施加影响,因此需要同时控制的自由度数目非常多。其中一个重要的研究内容是步态(腿的运动方式)自动生成的控制问题。前面已经提及,在这种场合可以引入运动捕获的示教方式。所谓运动捕获是指在实际任务的演练中,利用图像检测粘贴在对象上的亮点开展运动学研究的一种方法。通过将检测结果的再现,机器人即可实现期望的目标动作,其结果是大大缩减了动作生成的工作量。这个过程也属于示教再现的一种形式,称之为演示示教(teaching-by-showing)。但是这只是从人的立场来定义的,换成机器人的立场,它无非仍然是一种学习的方式(learning-by-watching),因此也可以称其为基于模仿的示教再现方式。

在不同级别上模仿人的行为,其内容将有很大的区别。日本学者川人在考察人类运动学习机制的同时,提出了模仿学习的分类方法(表4.4)^[1]。由于人与机器人的结构完全不同,所以即使针对位置或力进行“东施效颦”式的机械模仿,实现起来也很困难。也就是说,在某种意义下解释动作的意图是至关重要的。

表 4.4 基于模仿学习的几种策略

任务学习策略	运动的原始表现	学习者的智能	教师与学习者的差异
运动意图理解	运动的意图	完全	完全不同也可
生成计算的获取	任务动力学	良好	相当不同也可
任务级学习抽象表示	经由点	弱智	在一定程度上不同
盲目模仿	位置和力的轨迹	极低	完全相同

川人以机械手把玩日本传统木制玩具“剑玉”为例,具体研究了模仿学习^[1]。在表4.4的4种分类中它应该属于“任务级学习抽象表示”。研究基于人的运动控制的平滑原理,从脑运动学习的计算理论进行推导。首先用三维位置检测装置采集人把玩剑玉时的运动轨迹,从中选出少数经由点(图4.12)。依据平滑原理,这些经由点应该最能忠实再现原始运动轨迹。然后建立优化问题求解机械手运动轨迹。川人发现解的运动轨迹与原轨迹不完全相同,这反映出人和机器人在结构上的区别。也就是说,机器人依照原轨迹是无法成功把玩剑玉的,它需要进一步学习,不断改进运动轨迹,最终才能学会如何把玩剑玉。

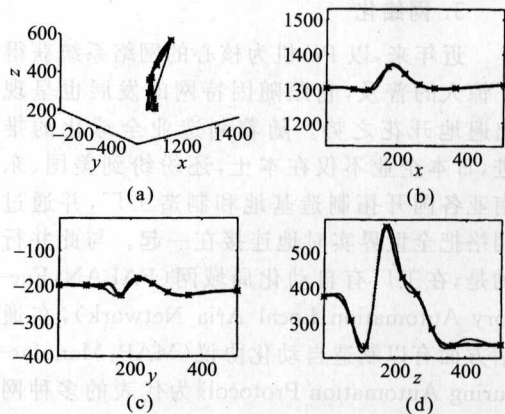


图 4.12 人手把玩剑玉的轨迹和轨迹的经由点再生成^[1]

吉池用图像处理的方法开展了识别人体上身运动的研究,然后针对拟人机器人拾放物品(pick-and-place)作业进行演示示教(图4.13)^[2]。通过识别对象物与手部的位

成各个关节角度的命令,这样就解决了人-机器人结构差别和环境误差带来的影响。应该指出,如果不进行这样的广域检测是很难理解作业意图的。

想象一下多自由度系统生成动作的难度,就会懂得演示示教应该是一种当然的选择。但是在另一方面,领会动作的意图,即智能也是必不可少的。所以,有人认为,与其要按照上面这样做,不如在初期阶段就从逻辑上生成作业行为来得更简单。例如,生成双足步行机器人的步态动作,即便用示教数据构成机器人的步态,在移动中也必须不断校验步行的稳定性。因此,如果从一开始就自动生成高稳定性的步态(或用进化算法选择最优步态)也许更可取。对那些研究进展不

大的动作,运动捕获仍然不失为一种标准方法。反之,在允许用编程语言描述机器人动作的场合,由于作业的意图得到充分的理解,所以智能问题并不太突出。

4.3.2 传感器反馈示教

上述示教方法均属于基本动作的示教。还有另一类作业,以去除焊接熔渣为例,此时在控制上要求只去除熔渣而不伤及零件本体,相应地就必须实施给定压力和运动速度的控制,即力/位置混合控制(或称阻抗控制)。推箱子的动作也与之类似,地板或墙壁的摩擦系数、箱子硬度、重心位置等都会影响施加力的方法。若把这样的控制方法称为技能,其实它现在仍然是人们研究的内容之一,

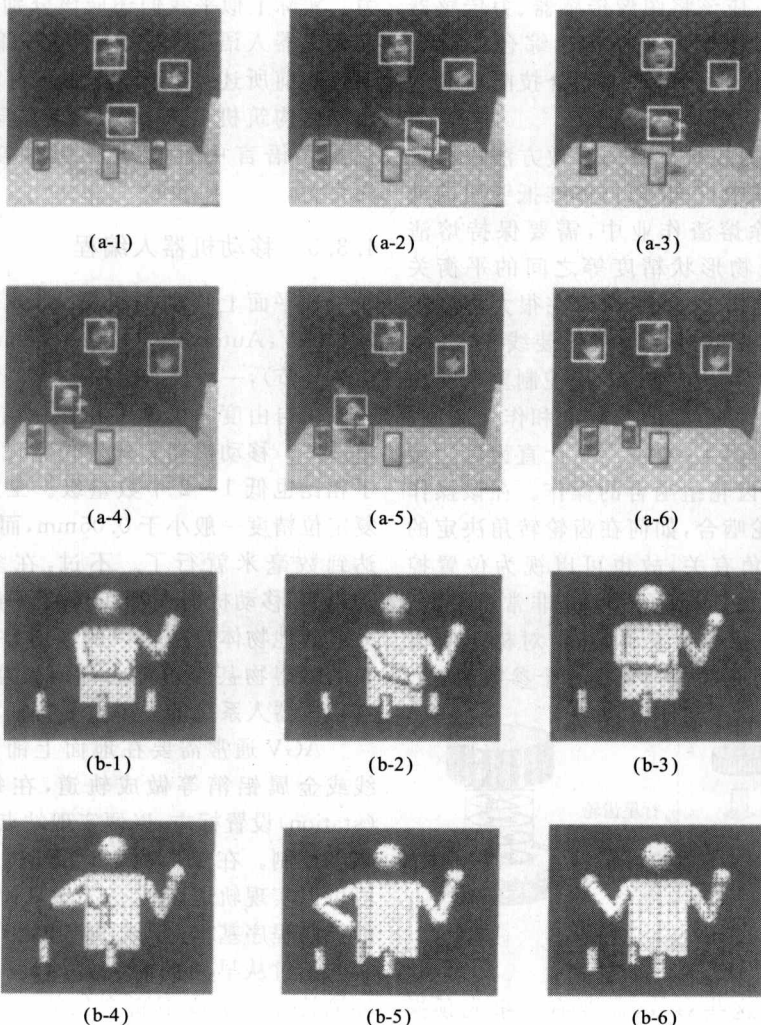


图 4.13 拾取作业的识别^[2]

而且已经有一部分技能动作的研究成果应用到产业领域。

如前述那样,机器人示教法与指定机器人作业顺序和位置组合是一回事。以往的示教再现和机器人的简单编程,大多数针对不需要传感器反馈的重复的动作,即使需要传感器反馈,顶多不过提供给 if-then-else 语句实现简单的程序分支选择,或者停留在借助于专用传感器进行定位的修正上。如果机器人作业的可靠性不高,它就无法在制造业中使用,因此应用的前提是传感器反馈必须具有很高的鲁棒性。众所周知,它现在仍有不少问题等待解决,如环境误差过大传感器无法正常工作、不能适应动态环境等。面对作业的多样化,尤其是去除熔渣、复杂组装等条件苛刻的任务,应该将图像传感器、力传感器反馈等合理地组合起来以实现综合技能示教。下面让我们来介绍有关综合技能作业的编程方法。

浅田等对力控制参数的示教方法进行了长期的研究,其中首推“把物体推抵壁面的动作”^[3]。在去除熔渣作业中,需要保持熔渣量、强度、对象物形状精度等之间的平衡关系,以便确定施力的大小,所以在很大程度上需要依靠操作者的经验。在组装线上,如将轴插入孔一类对微小力有严格控制要求的作业,事先都需要设定力的极限值和作业时间。作为应用实例,图 4.14 举出了让直齿轮边旋转边嵌入行星齿轮组啮合的操作。在该操作中,为了让齿轮啮合,如何在齿轮转角决定的力(该力与转角有关,故也可以视为位置控制)与轴向推力之间取得平衡是非常重要的。这些力目前还靠经验来确定,但对机器人语言而言,这不过是简单地给定一个参数而已。

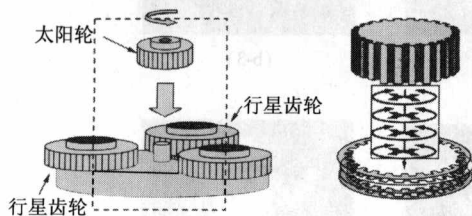


图 4.14 齿轮的组装

为了确定这些参数,需要有人事先预操作一下,从中提取作业参数。水川等认为“让机械实现与人匹敌的认知能力是十分困难

的,因此系统的作用仅仅是理解人的意图,提供实现作业目标的方法”。从这种观点出发,他们研究了机器人去除熔渣作业的示教问题^[4]。研究的目的是建立一个示教系统,它可将人的意图转达给机器人,它可以借助于接触式三维位置传感器获取作业区域信息,以及基于外部传感器(不用语言)表达信息,利用感觉实现示教的功能。由于焊接熔渣的位置和形状基本上是不确定的,仅靠纯粹的示教完成这类作业的自动化有困难。因此,他们在机器人手部安装了外部传感器(激光测距器)以测定熔渣高度,根据测量结果确定打磨参数,进行实际作业。

综上所述,可以说人们在力操作和图像处理方面的示教方面已经付出相当大的研究努力。实际上似乎我们还应该分别介绍一些借助于机器人语言对各种传感器编程的内容。不过如前所述,在这里我们不打算更多地触及如何构筑机器人示教系统本身,或者关于机器人语言中环境数据读取功能本身的内容。

4.3.3 移动机器人编程

在平面上移动的机器人,或者无人搬运车(AGV: Automatic Guided Vehicle, 参见第7篇 2.3 节),一般仅有平面上的3个自由度,与有6个自由度的机械手相比在结构上相对简单一些。移动机器人的定位精度与工业机械手相比也低1~2个数量级。工业机械手重复定位精度一般小于0.05mm,而移动机器人达到数毫米就行了。不过,在多数情况下AGV和移动机器人都在开放环境(即外部有人或其他物体自由出入的场所)中运行,环境中的障碍物甚至可能会随时发生改变,这是移动机器人系统的一个重要特征。

AGV通常需要在地面上铺设电磁引导线或金属铝箔等做成轨道,在每一个站点(station)设置标志,以便实现站点之间移动的顺序控制。在工厂内部运行时,通过管理手段可以实现轨道区域完全无障碍,所以AGV的控制程序基本上与顺序控制相同。

不过从早期的研究开始,移动机器人的环境就被设定成不断变化的。因此,从定位误差大和环境变化这两个方面移动机器人都对传感器反馈提出需求,而它的编程也应该

具有与一般算法语言同样的功能,即能够应对所有情况。足球机器人系统中用到的宠物机器人可以作为说明移动机器人运动控制系统的一个例子,下面我们对它的结构进行说明^[5,6]。

宠物机器人的每条腿有3个自由度,4条腿合计有12个自由度,加上头的转动和尾巴的摆动,总计超过20个自由度。虽然说宠物机器人的动作是确定的,但是即使让腿部按照设计预定的轨迹进行运动,躯体的移动量仍然会出现很大的差别,误差既大,系统环境又变化,因此需要按照基于行为的方式,来设计宠物机器人的驱动软件。所谓基于行为的方式,即依据环境状态的检测结果及时采取相应行动的方式。

图4.15表明宠物机器人软件系统的全貌,这是一种将传感器输入与驱动器输出相关联的结构。它并非只利用传感器输入方式,而能够根据自己已往的行为经历和传感器输入历史判别机器人当前的状态,并据此做出行为的选择。应该说,它是介于基于行为的结构和基于模型的结构的一种中间结构。

为了构建这样的应用系统,除了需要实时操作系统来管理输入/输出(I/O)装置之外,还要求能够使用通用性强的机器人语言,

亦即与通用算法语言具有同样结构的程序语言,甚至针对步行或信号处理配备标准的子程序。宠物机器人的行为就是通过调用这些子程序得以实现的。

新井民夫

参考文献

4.2 机器人语言的功能

- [1] JIS B 0134-1986 産業用ロボット用語
- [2] JIS B 8439-1992 産業用ロボット—プログラム言語 SLIM
- [3] 新井民夫編著:産業用ロボット言語“SLIM”, 日本規格協会 (1994)
- [4] S. Mujtaba and R. Goldman: AL Users' Manual (3rd Edition), Stanford AI Lab., AIM-344 (Dec. 1981), (邦訳) 金山裕, 坪内孝司

[5] JIS B 8440-1995 産業用ロボット—中間コード STROLIC

4.3 示教与编程

- [1] 川人 光男: 脳の運動学習, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.1 (1995) pp.11-19
- [2] 吉池孝英, 近野敦, 長嶋功一, 稲葉雅幸, 井上博允: 人間の実演によるヒューマノイドの動作生成基礎実験, 日本機械学会論文集 (C), Vol.65, No. 632 (1999) pp.1565-1570
- [3] 浅田春比古・出海晴生: 作業者の動作計測によるハイブリッド制御のための作業教示とプログラム生成, JRSJ, Vol.5, No.6 (1987) pp.24-31
- [4] 水川真: センサベースロボットにおける作業スキルの教示—バリ取り作業事例一, 計測と制御, Vol.

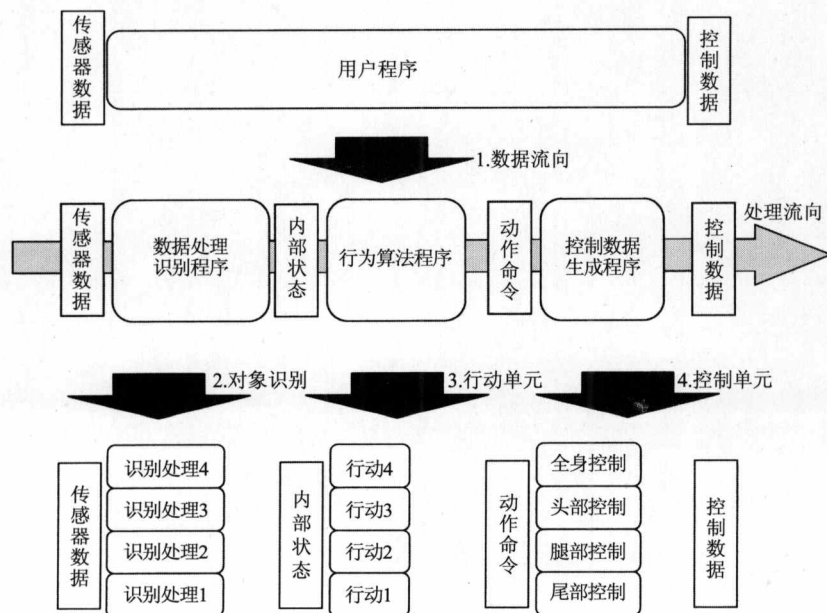


图 4.15 依据宠物机器人行动的编程

- 37, No.7 (1998) pp.499-503
- [5] 小林祐一, 湯浅秀男, 新井民夫: 脚型ロボットを用いたロボットサッカー, 精密工学会誌, Vol.2, No. 66 (2000) pp.185-188
- [6] 大橋健: 4足ロボットリーグのとりくみ, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.1 (2002) pp.45-46

本稿では、ロボットサッカーのシステム構成について、図1に示すように、上位制御系と下位制御系に分けて説明する。上位制御系は、ロボットの動作を制御するための高レベルの制御系であり、ロボットの動作計画、目標設定、環境認識、障害回避などの機能を果たす。下位制御系は、上位制御系からの指令を実行するための低レベルの制御系であり、ロボットの運動制御、関節制御、モーター制御などの機能を果たす。

図1は、ロボットサッカーのシステム構成を示すブロック図である。上位制御系は、ロボットの動作を制御するための高レベルの制御系であり、ロボットの動作計画、目標設定、環境認識、障害回避などの機能を果たす。下位制御系は、上位制御系からの指令を実行するための低レベルの制御系であり、ロボットの運動制御、関節制御、モーター制御などの機能を果たす。

図1の上位制御系は、ロボットの動作を制御するための高レベルの制御系であり、ロボットの動作計画、目標設定、環境認識、障害回避などの機能を果たす。下位制御系は、上位制御系からの指令を実行するための低レベルの制御系であり、ロボットの運動制御、関節制御、モーター制御などの機能を果たす。

図1の上位制御系は、ロボットの動作を制御するための高レベルの制御系であり、ロボットの動作計画、目標設定、環境認識、障害回避などの機能を果たす。下位制御系は、上位制御系からの指令を実行するための低レベルの制御系であり、ロボットの運動制御、関節制御、モーター制御などの機能を果たす。

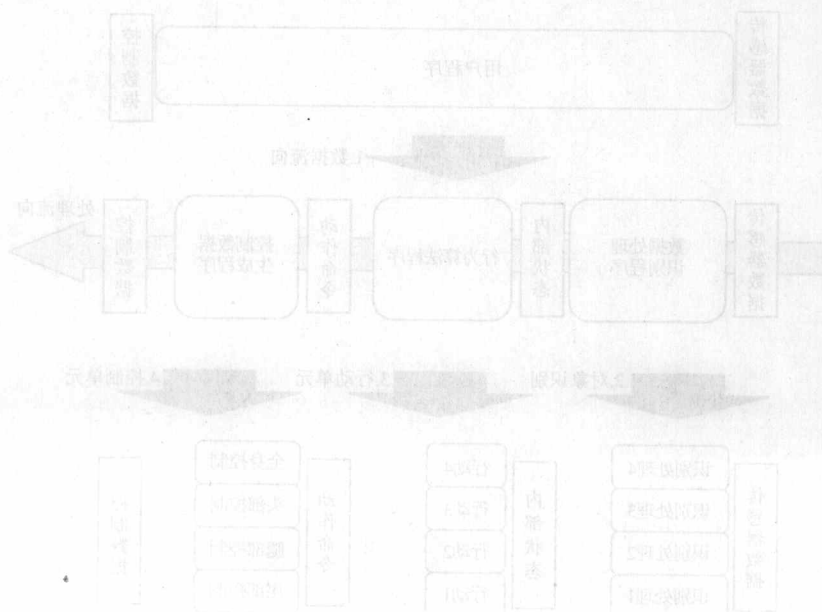


図1 ロボットサッカーのシステム構成図

第5章 机器人仿真

5.1 概述

5.1.1 仿真技术的作用

近年来,伴随机器人系统技术和计算机技术的进步,机器人已经发展成更为复杂的系统,如拟人机器人就是其中一个最典型的事例。在机器人的开发阶段至使用阶段,仿真技术正在发挥着越来越重要的作用。这不但要求对机器人的动作进行仿真,还要求在更广的范围内进行仿真,如对传感器的行为,对基于传感器信息的机器人的动作生成功能、行为学习功能、智能等都需要进行仿真,甚至能对机器人的全身运动进行更有效的实时模拟仿真。为此,必须构筑像机器人编程系统那样的综合开发环境,图 5.1 给出了这种综合开发环境的结构框图。支持编程的仿真技术包括:在计算机内表现机器人和作业对象的建模方法,利用模型对机器人进行作

业规划、轨迹计算的动作仿真方法,基于传感器功能对机器人运动进行校验的传感器仿真方法,以及方便设计人员设计机器人动作的图示方法等。

为实现这样的目标,必须极大地提高计算机技术,构建多台计算机的无缝操作网络,满足并行编程等的要求。现有的仿真技术无法完全真实地将实际世界模型化,而在仿真器中建立的模型与真实世界永远存在许多不同之处,再加上测量误差、控制误差等的影响,仿真技术仍然面临着很多的研究课题。

5.1.2 机器人仿真技术的分类

在用计算机控制操作机器人之前,可以运用各种类型的仿真技术对机器人进行设计、分析和编程。一般来说,机器人仿真技术涉及的范围是很广的,不过大致可以将其分为以下两大类:

① 完成机器人设计所必需的结构分析和运动分析。

② 支持机器人编程的仿真。

下面我们对机器人动作的仿真技术加以说明。

第①项仿真技术与机器人的结构设计相关,如机器人动力学系统的运动分析仿真、控制系统设计的仿真、支持机器人设计的仿真系统等。有关支持机器人设计的仿真系统将在本章 5.2 节中进行详细介绍。有关借助于数学公式处理系统进行设计仿真的技术将在本章 5.3 节中进行介绍。

第②项仿真技术与机器人的软件编程有关,如计算机环境建模与图形显示技术、基于模型的机器人动作程序仿真技术等。有关使用模型和图形显示的仿真技术在本章 5.4 节中进行介绍,支持编程的仿真技术将在本章 5.5 节中进行介绍。在本章的 5.6 节中则汇总了目前可供用户使用的仿真工具。

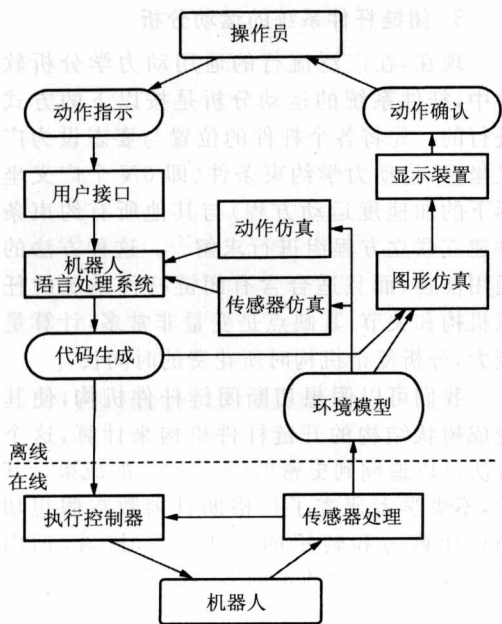


图 5.1 机器人编程系统框图

5.2 支持机器人设计的仿真技术

5.2.1 机器人动力学系统的运动分析仿真

1. 运动分析与仿真

对拟人机器人这类复杂的机器人系统来说,机器人的运动分析与仿真显得尤其重要,因为机器人系统的动作设计会涉及动力学特性。在机器人运动的力学分析中,有正动力学计算^[1,2]和逆动力学计算之分^[3,4]。前者是在给定电机驱动力等力学参数的条件下计算运动的结果。后者是在给定运动加速度的条件下计算实现该加速度所需的驱动力。所谓运动分析主要是指正动力学计算,通常被用于仿真来预测机器人的运动(图 5.2)。

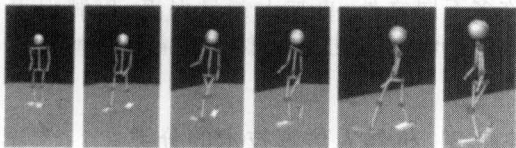


图 5.2 人体力学模型的运动分析

力学分析计算方法在开链连杆机构分析中得到广泛的关注。其中,最引人注目的是 Luh 等^[3]提出的逆动力学计算方法,也称为牛顿-欧拉(Newton-Euler)法。这些方法的特点是计算效率高,假设机器人的关节数为 N ,则计算量与 N 成比例(记为 $O(N)$)。显然,这种计算方法也可以从一般的开链连杆机构推广到树状结构的开链连杆机构。

从计算量来看,正动力学计算比逆动力学计算花费的时间长。文献[1]计算方法的计算量为 $O(N^3)$ 。如果机器人的自由度很多,这种计算方法的计算负担会很重,其原因在于为了求解机器人惯性矩阵系数的线性方程式,需要首先计算加速度。不过,费仁斯通(Featherstone)^[2]的 articulated body method 方法,巧妙地回避了上述计算,实现了 $O(N)$ 的计算效率。但是总的来看,正动力学的计算量比逆动力学计算的计算量 $O(N)$ 略多一些。

2. 用单位向量法计算正动力学

下面介绍一种比较容易理解的正动力学计算算法,即单位向量法。

这种计算方法的计算量为 $O(N^3)$,其特

点是可以从开链连杆机构开始计算,然后简单地向闭链连杆机构拓展^[5]。

杆件系统的运动方程如下:

$$\tau = A(\theta)\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) \quad (5.1)$$

式中, $\theta \in R^N$ 为关节角向量; $\tau \in R^N$ 为广义输入力; $A \in R^{N \times N}$ 为惯性矩阵; $b \in R^N$ 为与速度与重力有关的参数。

由式(5.1)可以直接计算全部关节的加速度。具体的计算步骤归纳如下:

① 给定驱动转矩 τ 。

② 设 $\ddot{\theta} = 0$ 并用牛顿-欧拉法进行逆动力学计算,将所得广义力 τ 设为 b 。

③ 按 $i=1, 2, \dots, N$ 的次序进行以下计算:

a. 使用单位向量(其第 i 个元素为 1,其他元素均为 0) $e_i \in R^N$, 设 $\ddot{\theta} = e_i$ 。

b. 使用牛顿-欧拉法做逆动力学计算,将所得广义力 τ 设为 f_i 。

c. 使用下式计算 a_i , 将它设为惯性矩阵 A 的第 i 列:

$$a_i = f_i - b \quad (5.2)$$

④ 将 τ, b, A 代入下式,计算广义坐标下的加速度:

$$\ddot{\theta} = A^{-1}(\tau - b) \quad (5.3)$$

⑤ 对 $\ddot{\theta}$ 进行数值积分运算得到 $\dot{\theta}$ 和 θ 。

3. 闭链杆件系统的运动分析

现在,在广泛流行的通用动力学分析软件中,杆件系统的运动分析是按以下的方式进行的。先将各个杆件的位置与姿态设为广义坐标,将动力学约束条件(即 $6N$ 个广义坐标下的加速度运动方程)与其他所有约束条件建立联立方程组进行求解^[6]。这种方法的通用性强,而且适合含有闭链杆件系统的任意机构和关节,其缺点是变量非常多,计算量庞大,分析复杂机构时所花费的时间长。

我们可以假想切断闭链杆件机构,使其变成树状结构的开链杆件机构来计算,这个方法可以追溯到史密斯(Smith)^[7]的成果。其后,不少学者研究了拉格朗日乘数在假想切断点计算力和转矩的方法^[8~10],接着,远山等^[11]又提出高效的正动力学计算方法。

上述方法必须给出假想切断点几何约束条件的显式表达式。为了避免出现这一点,有人提出了利用与驱动关节相关的被动关节

雅可比矩阵的方法^[5,12],此时与拉格朗日乘数无关。如果工业机器人有平行连杆机构,那么它的雅可比矩阵是一个常数矩阵,因而计算效率会很高。后来,针对双足步行机器人运动分析的需要,有人提出一种用雅可比矩阵将完全(holonomic)约束表达成广义坐标约束条件式的计算方法^[13]。

4. 广义闭链杆件机构的运动分析

把闭链杆件机构设想成在几个关节上切断的假想开链杆件机构。假设开链杆件机构所有的关节都被驱动,它有 N_0 个关节 $\theta_0 \in R^{N_0}$, 计算为实现与原闭链杆件机构要求完全相同的运动所必需的驱动转矩 $\tau_0 \in R^{N_0}$ 。这时它适合应用牛顿-欧拉法等开链杆件机构逆动力学的高效计算方法。

用下面两个公式将 τ_0 转换成 N_A 个驱动关节 $\theta_A \in R^{N_A}$ 的驱动转矩 $\tau_A \in R^{N_A}$:

$$\tau_G = W^T \tau_0 \quad (5.4)$$

$$\tau_G = S^T \tau_A \quad (5.5)$$

式中,若假设闭链杆件机构的全部自由度为 N_F , 表示闭链杆件机构状态的广义坐标为 $\theta_G \in R^{N_F}$, 与其相应的广义力为 $\tau_G \in R^{N_F}$, 则雅可比矩阵 $W \in R^{N_0 \times N_F}$, $S \in R^{N_0 \times N_A}$ 可以由以下两式计算:

$$W = \frac{\partial \theta_0}{\partial \theta_G} \quad (5.6)$$

$$S = \frac{\partial \theta_A}{\partial \theta_G} \quad (5.7)$$

具体的计算步骤是先通过假想开链杆件机构的逆动力学计算出 τ_0 , 并由式(5.4)将其变换为广义力 τ_G , 然后求解方程式(5.5), 计算出驱动关节的转矩 τ_A 。如果机构有驱动冗余度, 可以通过优化计算实现驱动转矩的具体分配^[12,14]。

如果是属于并联机构, 那么可以利用机构的并联特性计算雅可比矩阵的 W 和 S 。对于简单机构, 如平面机构, 它们往往是常数矩阵, 因此可以从物理意义上直观地求取这些矩阵。

在本小节 2. 中介绍了单位向量法, 如果把 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \tau$ 置换成 $\theta_G, \dot{\theta}_G, \ddot{\theta}_G, \tau_G$, 就可以开展闭链杆件系统的正动力学计算了。 $\ddot{\theta}_G$ 以外的关节加速度的计算将在本小节 6. 中予以说明。

5. 广义闭链杆件机构的 W, S 矩阵计算方法

下面介绍计算任意闭链杆件机构的 W, S 矩阵的计算方法。假想在某一个关节处切断闭链系统, 它被分割成两条支链。根据在切断点处速度、角速度相同的条件, 可以计算满足下式的 $J_{Li} \in R^{6 \times N_i}$:

$$J_{Li} \dot{\theta}_j = 0 \quad (5.8)$$

式中, N_j 为全部关节数; θ_j 为全部关节角数。

式(5.8)描述了闭链系统的约束条件。 J_{Li} 元素的计算步骤与开链杆件机构关节角表达的手部位置的雅可比矩阵的计算步骤一致。

假设机构的闭链数为 N_L , 将 $J_{Li} (i=1, 2, \dots, N_L)$ 按纵向排列成 $J_C \in R^{6N_L \times N_j}$, 就有

$$J_C = \begin{bmatrix} J_{L1} \\ J_{L2} \\ \vdots \\ J_{LN_L} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

设 J_C 的 $6N_L$ 行元素中有 m 行是独立的, 把它们集合起来就得到 $J_{Cm} \in R^{m \times N_j}$, 从全部闭链机构可以得到 m 个独立的约束条件

$$J_{Cm} \dot{\theta}_j = 0 \quad (5.10)$$

由于对 N_j 个关节有 m 个约束条件, 故可以由下式求得机器人的全部自由度数 N_F :

$$N_F = N_j - m \quad (5.11)$$

将 J_{Cm} 中 m 个独立列向量集中组成矩阵 $J_s \in R^{m \times m}$, 剩下的集中在一起构成矩阵 $J_G \in R^{m \times (N_j - m)}$ 。若 θ_j 满足下式要求, 那么即使预先安排了它们之间的顺序, 也不会失去一般性。

$$J_{Cm} \dot{\theta}_j = (J_s | J_G) \begin{pmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_G \end{pmatrix} = 0 \quad (5.12)$$

式中, $\theta_s \in R^m$, $\theta_G \in R^{N_j - m}$ 分别为 θ_j 中与 J_s, J_G 对应部分组成的向量。由式(5.12)可以得到

$$J_s \dot{\theta}_s = -J_G \dot{\theta}_G \quad (5.13)$$

根据定义, J_s 为正则矩阵, 于是式(5.13)可以变形为

$$\dot{\theta}_s = H \dot{\theta}_G \quad (5.14)$$

式中, $H \in R^{m \times N_j}$ 为与 θ_s 和 θ_G 有关的雅可比矩阵, 可用下式定义:

$$H = \frac{\partial \theta_s}{\partial \theta_G} = -J_s^{-1} J_G \quad (5.15)$$

显然, 通过式(5.14) $\dot{\theta}_G$ 决定了全部关节运动

的 $\dot{\theta}_j$,由此可以把 θ_G 确定为广义坐标。

根据图 5.3 所示的方法,按照以下步骤可以由 H 求得 W, S 。

(1) W 的第 i 行 当 θ_0 的第 i 个关节为非广义坐标,并且相当于 θ_s 的第 j 个元素时,它可以直接设为 H 的第 j 行。当 θ_0 的第 i 个关节是广义坐标,且相当于 θ_G 的第 j 个元素时,则 W 的第 i 行的第 j 个元素为 1,其他元素都为 0,这时 W 的第 i 行是一个单位行向量。

(2) S 的第 i 行 与 W 进行同样的操作,只需要将其中的 θ_0 换成 θ_A 即可。

按照以上的方式,可以与开链机构一样求得 J_C ,再以此为基础对一般的闭链杆件机构计算雅可比矩阵 W, S 。在进行机构全部自由度或转矩的变换时它们是必需的。

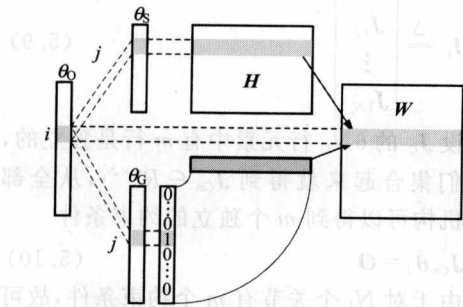


图 5.3 从 H 矩阵求解 W 矩阵的方法

6. 加速度关系式

将式(5.14)对时间进行微分得到加速度关系式

$$\ddot{\theta}_s = H \ddot{\theta}_G + \dot{H} \dot{\theta}_G \quad (5.16)$$

由正动力学计算可以求得的广义坐标加速度 $\ddot{\theta}_G$,但在求解其他关节加速度 $\ddot{\theta}_s$ 时必须进行式(5.16)的计算。由于 H 和 \dot{H} 已经给出,故可以得到式(5.16)右边第二项 $\dot{H} \dot{\theta}_G$ 的计算方法。

由式(5.15)可以得到

$$\dot{H} \dot{\theta}_G = - \left[\frac{d}{dt} (J_s^{-1}) J_G + J_s^{-1} \dot{J}_G \right] \dot{\theta}_G \quad (5.17)$$

再由 $J_s^{-1} J_s = E$ 可以得到

$$\frac{d}{dt} (J_s^{-1}) J_s + J_s^{-1} \dot{J}_s = O \quad (5.18)$$

将式(5.13)和式(5.18)代入式(5.17),经整

理变形得到

$$\begin{aligned} \dot{H} \dot{\theta}_G &= - J_s^{-1} (\dot{J}_s \dot{\theta}_s + \dot{J}_G \dot{\theta}_G) \\ &= - J_s^{-1} \dot{J}_{Gn} \dot{\theta}_j \end{aligned} \quad (5.19)$$

式中, $\dot{J}_{Gn} \dot{\theta}_j$ 可以从 $\dot{J}_C \dot{\theta}_j$ 中取出与 J_{Gn} 相应的部分进行计算。此外,与 $\dot{J}_C \dot{\theta}_j$ 中各个闭链机构对应的部分同样可以按串联杆件机械手的计算方法求取。

7. 浮游杆件系统的运动分析

浮游杆件系统可以看成在基础和惯性坐标系之间有 6 个自由度的被动运动副,它的基本正动力学计算与固定杆件系统一样。这时,如果不把 6 个自由度的自由关节分解成 6 个单自由度的关节,而当作 1 个关节来处理,那么动力学计算的效率就会很高。

8. 可变形杆件系统的运动分析

开展拟人机器人、人、动物等的运动分析时我们发现,在步行双腿着地期间,在双手抓取物体期间,或者握住扶手期间可变形杆件系统呈现闭链杆件构形,但是有时又返回开链杆件的构形,因此有必要对可变形杆件系统进行处理。这时,或者应该选用针对可变形杆件系统的通用运动分析软件,或者应该准备若干个处理变结构杆件系统特殊构形的算法,以便有针对性地调用它们。

在本小节 6. 中介绍的计算方法可以处理任意的闭链杆件系统。如果它总能描述和计算杆件系统的话,那么用一个算法就能够满足允许构形自由变化的运动分析方法。

计算杆件系统的链式结构时应该注意的地方是不要使计算的开销过大,因此连杆机构的表述方法显得十分重要,例如,有用矩阵表述连杆机构的方法^[6,16]。该方法的优点是在同一种机构模型中描述构形的变化比较简单,但是每当计算加速度时,为了确认相邻杆件和闭链机构却需要花费相当大的计算工作量。

9. 杆件系统的链式表示

在可变形系统动力学算法中有一种使用指针的杆件系统链式表示法^[17,18]。当进行力学计算时,可以按照沿顺方向(从机架向末端杆件)或沿逆方向(从末端杆件向机架)采用逐个渐近计算运动链的方法。为了提高计算效率,用 4 个指向其他杆件的箭头(指针)表示杆件系统的链式结构,分别称之为父母(parents)、兄弟

(brothers)、孩子(children)、现实/虚拟(real/virtual)。这个方法无需确认关节之间是否互连。表示杆件结构的数据量与杆件数目成正比,所以即使系统的构件数较多,数据量也不会急剧膨胀。指针形式与C++编程结构也是一致的,因此不但安装方便,而且运行效率高。

10. 可变形杆件系统的运动分析和边界条件

如果杆件系统发生结构变形,那么变形前、后的速度是不连续的。以人在单杠上做引体向上的动作为例,变形前手的相对速度不为零,变形后手的相对速度变为零。因此,应该根据运动链条件的变化计算变形后的广义坐标的速度,并以此作为边界条件展开后续运动分析。此时与刚体动力学系统处理碰撞问题的方法一样,可以采用动量守恒定律和恢复系数(0)来计算^[17,18]。

11. 接触与碰撞的分析

关于接触与碰撞的算法很多^[19,20]。不过这些算法的目的都以接触与碰撞的分析为主,虽然正确,但计算量大,不利于快速和实时计算。

吉田^[21]和辻尾等^[22]对机械手碰撞的计算方法进行了研究。文献[21]未考虑摩擦力的界限,而文献[22]虽然考虑了碰撞中的动摩擦力,却未计入静摩擦对移动的影响。藤本等^[23]把接触引起的约束视为微小完全非弹性碰撞反复作用的结果,并据此进行了建模。

由接触与碰撞引起的约束有以下特点:

- ① 约束条件因接触状态的不同而不同。
- ② 因接触与碰撞产生的冲量和碰撞力是有限的。

为此,接触与碰撞往往被当作线性规划问题处理,如弹簧、阻尼模型假设、不等式约束条件等。迄今为止,有关的计算方法大致可以分为以下两类:

(1) 弹性阻尼模型 在接触与碰撞的两个物体之间设想虚拟弹簧和阻尼器,据此建立接触力模型^[24~26]。虽然很容易由两个物体的相对运动计算出接触力,不过由于碰撞时产生较大的冲击力和较大的加速度,数值积分容易发散,需要减小采样时间,但因此又引起计算量增加的^[27]问题。算法的优点是改变弹性阻尼系数就能表示出物体不同的柔软度。在这个模型下,另有一些研究把两个物

体之间设想成非线性的弹簧和阻尼器,结果不但改进了数值计算的稳定性,而且使计算值更加接近实验结果^[28]。

(2) 刚体模型 该方法假设接触与碰撞的两个物体均为刚体,在附加接触力不等式约束条件下求解运动方程^[19,20],由碰撞前的速度计算碰撞发生后的速度。碰撞计算依据动量守恒定律,并假设速度的变化不连续。在不便处理伴有很大冲击力和加速度的接触过程时,可以考虑改用积分分析法计算速度的变化。该方法的计算稳定性好,无需让采样时间发生变化。由于需要求解含不等式约束条件的方程式,故该算法将使弹性阻尼模型更加复杂。另外,既然是刚体模型,就应该把所有的杆件都视为刚体,所以该方法不能处理带柔软性的物体。

在刚体模型计算方法中,还有人提出一种方法,据说通过反复计算基于假设的约束力和反复校验假设的合理性,能避免不等式约束条件的增加,提高计算效率^[29]。

至于碰撞模型,最常用的是牛顿碰撞模型,其特点在于利用恢复系数宏观表示阻尼等因素引起的能量损失。此外还有一种泊松碰撞模型^[19],其特点在于把碰撞划分成压缩和膨胀两个阶段。前者比后者简单一些。如果是人体与环境的碰撞,由于生物体组织具有黏弹性,因此很少产生抖振。在拟人机器人的脚与地面的碰撞中,有人在脚踝和脚掌部使用黏弹性材料和机构^[30],因此可以视这种碰撞为恢复系数 $e=0$ 的完全非弹性接触。如果设恢复系数为 $0 < e \leq 1$,就表示物体之间的碰撞可能产生抖振。

有关检测接触与碰撞的干扰分析算法请参见文献[31]。实际上,本小节4~11中有关计算方法的部分均可以使用动力学计算引擎OpenHRP^[32]。

12. 积分法

常用的数值积分方法有欧拉法和龙格-库塔法。用欧拉法做数值积分,在一个采样周期内只计算一次加速度积分,计算量小,但其缺点是计算精度低,在短时间内计算结果就会发生漂移。因此,要么借助于反馈控制保证稳定性(吸收仿真数值误差),要么限定在精度要求不高的场合应用。反观龙格-库

塔法,需要改变条件做4次加速度计算以完成一个采样周期间隔内的积分。与欧拉法相比,它的计算量大,但是龙格-库塔法仍然是目前应用最广的数值积分方法。

隐积分法是边预想系统的变化边进行积分的方法。一般说来,它的计算精度高,但是预测工作量大。不过,如果问题的预测计算很简单,该方法用于近似计算仍是可取的。巴拉夫(Baraff)等^[33]利用隐积分法对布料的运动进行了仿真。此时布料的运动方程式被描述成多数简单弹簧和阻尼器彼此连接起来的多质点系统。

在本小节的11.中我们曾经提及,在接触与碰撞的弹性阻尼模型计算中,应该缩短数值积分的间隔以确保计算的精度。文献^[34]借助于隐积分法建立了拟人机器人等杆件系统碰撞问题的求解方法。这个方法就是通过减小碰撞过程中杆件系统的变形,以弹簧和阻尼器的变形为主,来做隐积分法的近似预测,减少了计算量。虽然方法的积分计算间隔长,但剪度高,故提高了碰撞分析的计算效率。

13. 并行计算方法

除了文献^[2]的方法之外,还有一些计算效率达到 $O(N)$ 的正动力学算法^[35~38]。最近,可变形杆件系统也有了 $O(N)$ 计算效率的算法^[39]。尽管系统的参数不同,这些方法的计算量都能够与 N 成正比。不过,由于与程序运行的环境有关,因此实际计算量的比较未必那么客观。

从理论上讲,计算量 $O(N)$ 已经是最高的计算效率了。所以,为了追求更高的计算速度,人们又从正动力学的并行计算上想办法。由于该算法的速度是最快的,所以若同时使用 $O(N)$ 个处理器进行并行计算,那么计算时间应该能达到 $O(\lg N)$ 。费佳尼(Fijany)等^[40]的算法最先对串联杆件系统实现了 $O(\lg N)$ 的计算效率。Featherstone扩展了 articulated body 方法,开发出具有 $O(\lg N)$ 的计算效率的 divide and conquer algorithm^[41,42]。Anderson等^[43]开发了可以具有同样计算效率的 hybrid direct/iterative algorithm。该方法的特点是通过严密的计算和反复近似计算并行求解。山根等^[44]将可变形系统算法加以扩展,提出

了计算量为 $O(\lg N)$ 的并行计算算法。该算法的特点也是 $O(N)$ 个处理器并行计算实现 $O(\lg N)$ 的计算效率,其中每一个处理器都运行具有同样计算效率 $O(N)$ 的算法。

Featherstone、Anderson、山根等算法的基本思路如图5.4所示,都假想将杆件一个一个装配起来进行计算,再一个一个进行分解计算。

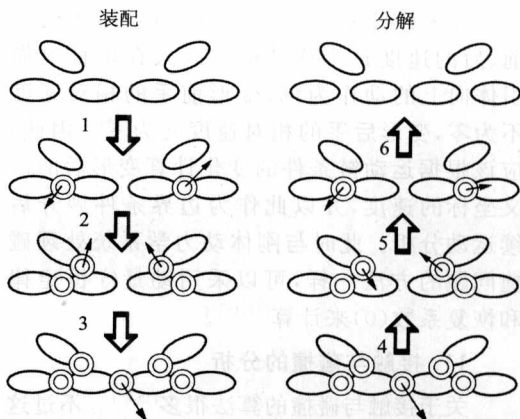


图5.4 计算量 $O(\lg N)$ 算法中假想杆件系统的装配/分解计算

中村仁彦

5.2.2 控制系统的仿真

1. 利用仿真进行控制系统设计

在以工业环境为代表的各种环境中应用时,要求机器人具有高速、高精度完成复杂作业任务的能力。为了能使机器人完成这样的任务,人们研究开发了轨迹跟踪控制、力控制、多机器人协调控制等形形色色的控制系统。

按照某种作业目标设计的控制系统在实际应用之前,通常应该在计算机上进行仿真,对系统性能做出初步评价,然后根据仿真结果,再对机器人的结构进行再设计,对控制系统做一定修改,直至实际系统能够真正实现预定的目标为止。

有关控制系统设计和性能评价的仿真历来都是在工作站一类的计算机上进行的。不过,现在PC机的运行速度有了极大提高,价格也大幅度降低,所以在PC机上进行仿真也已经相当普遍了,这样一来大大缩短了产品开发的时间和进程。

设计控制系统需要完成各种计算,如系统的时域、频域响应,基于控制系统的受控机器人运动分析和参数调整等。传统上人们一直选用控制系统计算机辅助设计(CACSD: Computer Aided Control System Design)工具软件作为面向控制系统的CAD/CAE工具软件。

商用CACSD工具软件中包括的典型软件有MATLAB^[45]和MATRIXx^[46]等。此外,也有一些免费工具软件,如Octave、RLab和Scilab等。使用这些计算机辅助设计工具软件能极大地提高机器人控制系统的设计效率。

下面我们介绍控制系统的一般设计步骤,并且以机械手运动为例,说明如何设计机械手的控制系统,以使它的手部实现期望的运动。

2. 机械手的控制系统设计

通常,控制系统设计(Design of Control System)按照如图5.5所示的步骤进行,这大致可分成以下三个阶段^[47,48]:

- ① 控制系统的建模(建模、模型校验)。
- ② 控制系统设计(控制系统的设计、校验)。
- ③ 控制系统设计阶段的评价(控制的实施、评价)。

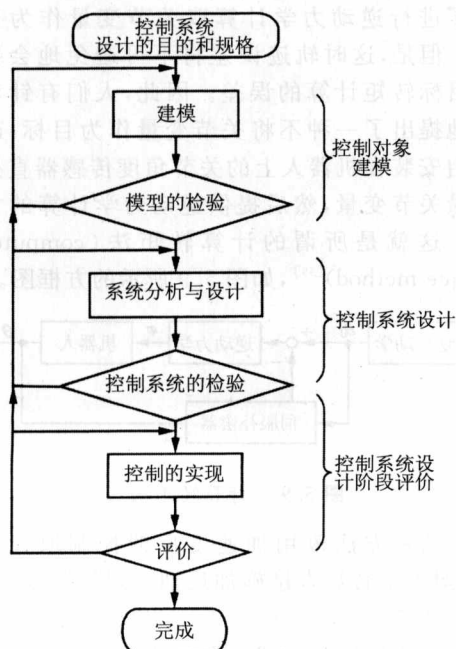


图 5.5 控制系统设计的步骤

下面以刚性机械手为例,利用设计机械手手部目标轨迹跟踪控制系统的例子介绍上述步骤。

1) 建模

一般说来,刚性机械手属于关节运动耦合的非线性系统,其动力学方程可以表示如下:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + \Gamma\dot{\theta} + g(\theta) \quad (5.20)$$

式中, τ 为各关节的输入转矩向量; θ 为各关节的角度向量; $M(\theta)$ 为惯性矩阵; $h(\theta, \dot{\theta})$ 为离心力、哥氏力向量; Γ 为黏性摩擦矩阵; $g(\theta)$ 为重力向量。

为了求解方程式必须先辨识式(5.20)中的各个参数。由于机械手的参数随负荷的变化而改变,因此在辨识参数时应该考虑负荷的影响。

模型辨识是否正确,需要经过仿真予以确认,这对后续设计是至关重要的。由于式(5.20)所示的机械手自身并不稳定,因此只能在简单结构控制系统的状态下进行仿真,与同样系统的实际机械手的响应进行比较。

2) 控制系统设计

在很多情况下,微处理器就能对刚性手臂进行数字控制,但由于式(5.20)所示的机械手的各个关节之间存在运动耦合,设计直接数字控制系统存在一定困难。一般先采用连续时间设计控制系统,然后在数字控制系统中实现。

在连续时间系统中设计控制系统的问题是针对动力学方程式(5.20)设计什么样的控制系统的问题。如果非线性影响不大,给每个关节的驱动器配备一个简单的控制系统就足够了,但是如果非线性影响很严重,同时又要求进行高速、高精度控制,那么必须在非线性前提下构成控制系统。

构成什么样的控制系统好呢?实际上这个问题可以借助于仿真来进行探讨。设计控制系统时应该反复进行仿真,通过改变参数满足给定的性能指标(如减少轨迹跟踪误差等)。

一般说来,机械手的运动由作业坐标系(通常为直角坐标系)给出。因此,机械手控制系统的组成必须满足作业坐标系给出的运动要求。实现在作业坐标系中给出运动的控制系统的途径有两条:一条是直接在作业坐标系中构成反馈控制系统;另一条是先将作

业坐标系中的运动转换为关节坐标系中的运动,然后再用关节坐标系构成反馈控制系统(图 5.6)。前者的优点是不必进行逆运动学计算,但是在设计控制系统时无法照顾到各个关节驱动器的特性差异。后者必须进行逆运动学计算,但是允许让反馈控制规律适应各个关节驱动器的不同特性,所以它是实际机器人控制系统设计经常采用的做法。下面介绍基于后一种方法设计的两类控制系统。

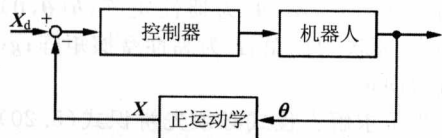


图 5.6 作业坐标系中的反馈控制

(1) 带前馈的 PD 反馈控制系统 考虑到刚性手臂的非线性,试设计下式的控制规律:

$$\tau = M_c(\theta_d)\ddot{\theta}_d + h_c(\theta_d, \dot{\theta}_d) + \Gamma_c \dot{\theta}_d + g_c(\theta_d) \quad (5.21)$$

式中,下角标 c 表示有关函数是基于被辨识的参数标称值计算的。设逆动力学计算的关节变量为 θ_d ,如果给定了机械手跟踪的期望轨迹 X_d ,可以通过逆动力学计算推导出各个关节的输出转矩。若将该转矩施加于实际机械手上,而该机器人处在无参数误差的理想状态,那么应该可以实现期望的运动。

但实际上由于建模误差、外部干扰等的影响,将按上述方法设计的控制规律用于实际机器人的运动控制是不现实的。因此,考虑在式(5.21)所示的控制系统中增加 PD 反馈控制

$$\tau = M_c(\theta_d)\ddot{\theta}_d + h_c(\theta_d, \dot{\theta}_d) + \Gamma_c \dot{\theta}_d + g_c(\theta_d) - K_v(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - K_p(\theta - \theta_d) \quad (5.22)$$

式中, K_v 、 K_p 分别为 PD 反馈的微分系数和比例系数,控制方框图如图 5.7 所示。这个控制系统可以通过关节角的角度和角速度进行反馈,能克服轨迹误差或模型误差带来的干扰。

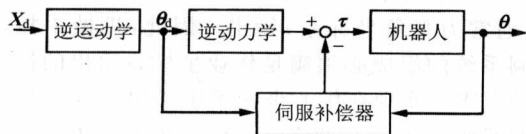


图 5.7 前馈+PD 反馈

以下讨论用微处理器将上述设计的连续时间控制系统转化为数字控制的方法。为此,对式(5.22)的输入做以下修正:

$$\tau_k = M_c(\theta_{dk})\ddot{\theta}_{dk} + h_c(\theta_{dk}, \dot{\theta}_{dk}) + \Gamma_c \dot{\theta}_{dk} + g_c(\theta_{dk}) - K_v(\dot{\theta}_k - \dot{\theta}_{dk}) - K_p(\theta_k - \theta_{dk}) \quad (5.23)$$

式中,下标 k 表示时间 $t = k\Delta t$ 的值, Δt 为采样周期。根据式(5.23)可以按照图 5.8 所示的时序对机械手的各个关节施加控制转矩,实现机械手的期望运动控制。

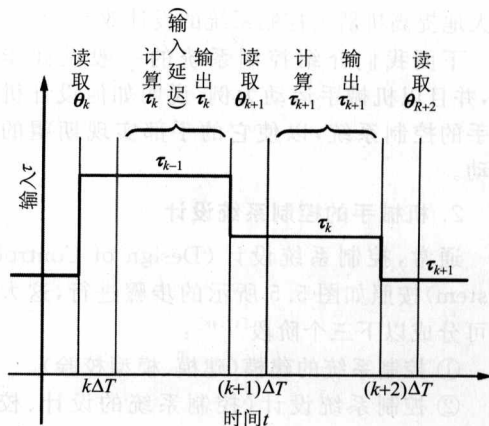


图 5.8 数字控制系统中实现的输入

(2) 计算转矩法 在前面的控制系统中,为了进行逆动力学计算取关节变量作为目标。但是,这时轨迹误差将不可避免地会导致目标转矩计算的误差。因此,人们有针对性地提出了一种不将关节变量作为目标,改成由安装在机器人上的关节角度传感器直接测量关节变量,然后提供逆动力学计算的方法。这就是所谓的计算转矩法(computed torque method)^[49],如图 5.9 所示的方框图。

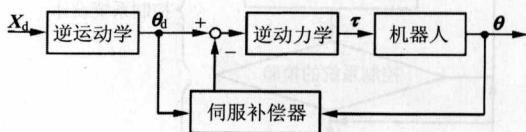


图 5.9 计算转矩法

这种方法改用加速度反馈控制取代由 PD 对关节转矩直接施加反馈,这样就可以实现下述理想状态下的误差方程线性化。设目标关节角度向量为 θ_d ,则可以对加速度施加以下的反馈:

$$\ddot{\theta}_a = \ddot{\theta}_d - K_v(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - K_p(\theta - \theta_d) \quad (5.24)$$

若令

$$\theta_e = \theta - \theta_d \quad (5.25)$$

则可假定机械手的各个关节按加速度 $\ddot{\theta}_a$ 运动,亦即若假设 $\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_a$,于是有

$$\ddot{\theta}_e + K_v \dot{\theta}_e + K_p \theta_e = 0 \quad (5.26)$$

再假设 K_v 、 K_p 为正定矩阵,显然有

$$\theta_e \rightarrow 0, t \rightarrow \infty \quad (5.27)$$

基于由式(5.24)求得的加速度,再应用机器人逆动力学,可以使机器人的关节转矩得到为

$$\tau = M_c(\theta) \ddot{\theta}_a + h_c(\theta, \dot{\theta}) + \Gamma_c \dot{\theta} + g_c(\theta) \quad (5.28)$$

为了将这个控制系统改成数字控制,与式(5.23)类似,将从下式求出的关节转矩施加给对应关节的执行器之后,就可以构建计算转矩法的控制系统:

$$\tau_k = M_c(\theta_k) \ddot{\theta}_{dk} + h_c(\theta_k, \dot{\theta}_k) + \Gamma_c \dot{\theta}_k + g_c(\theta_k) \quad (5.29)$$

3) 控制系统的评价

前面介绍了两种机械手跟踪给定轨迹的控制系统,它们各有优、缺点。例如,上述(1)中将PD附加到前馈控制系统后,就为事先做离线逆动力学计算提供了条件,其结果是控制对计算机的速度要求不高。与此相关还能缩短控制采样周期,因此该系统的长处是适宜数字伺服系统控制,能克服数字化对伺服系统可能带来的不良影响。

与此相反,它的短处是手部给定运动轨迹不同会对机械手动力学方程中的惯性矩阵和非线性项造成明显影响,因此它不可能对不同轨迹保持同样的响应。也就是说, K_v 、 K_p 很难被调整到适合整个工作空间的状态。

上述(2)介绍的计算转矩法,由于已经在关节空间中实现了机器人动态特性的线性化,因此它有不受机器人姿态变化的影响,保证各个关节控制系统动态特性不变的长处。不过,为此需要高速控制计算机实时地计算逆动力学。现在,由于计算机CPU的速度已经相当快了,再配合各种高效逆动力学计算方法,所以逆动力学的实时计算已经逐渐成为可能。文献[50]~[52]介绍了一些高效计算机机械手动力学仿真的方法。

控制系统设计面临一个共同问题,即在刚性手臂控制中,采样间隔和输入延迟会对机器人的运动造成影响。因此,在控制系统设计完毕尚未投入实用前,按照图5.8所示的控制输入,通过仿真先行确认这些原因对设计系统性能的负面影响不至于引起在实际使用中的很大问题。此时需要确认的内容如下:

- ① 离散化的位数。
- ② 采样周期的间隔。
- ③ 输入时间延迟的影响程度等。

如果硬件条件的限制使确认上述内容有困难,那么至少应该在硬件限制允许的范围内进行仿真。依据仿真结果修正连续时间控制系统的设计,直到所设计的控制系统能达到满意的性能为止。

如上所述,可以对各个控制系统的特性反复地进行仿真,探讨什么样的控制系统最好,从而设计出能满足给定要求的系统。完成上述一系列工作后,再结合实际刚性手臂进行实验,确认设计出的系统是否能满足设计性能指标。如果答案肯定,即可结束控制系统的设计过程。

3. 复杂控制系统的设计

随着机器人技术的发展,它的形式越来越多样化。例如,并联机械手、移动机器人、多足机器人、拟人机器人等。它们与上一节介绍的机械手一样,基本上可以按照相同的步骤进行控制系统的仿真。

不过,处理拟人机器人这类结构可变形的复杂系统,也可能会出现一些传统仿真软件难以应付的问题。与机械手相比,拟人机器人这样的系统随着抓取物体、行走之类的运动,杆件的构形在实时地发生着变化,传统软件往往需要对结构做离线定义,因此就会出现一些仿真任务无法实现的情况。

对自由度特别多的复杂系统进行仿真,必须开发高效动力学计算方法。为此往往需要专用仿真软件。文献[53]给出一种人形姿态的动力学仿真软件。

平田泰久 小菅一弘

5.3 数学公式处理与仿真

5.3.1 机器人数学公式处理系统的历史

电子计算机诞生不久就开始了计算机解

算数学公式的尝试,20世纪50年代初期,人们成功地用计算机完成单变量多项式和四则微分的运算。多年来,已经有许多商业化的数学公式处理软件问世,如 REDUSE、MACSYMA、AXIOM、SMP、muMATH、Mathematica、Maple、MathCAD 等,还有一些免费数学公式处理软件,如 RISA/ASIR、GAP、Maxima、PARI-GP^[1]等。当然,数学公式处理软件在机器人学领域应用也非常广泛。对机器人手臂运动的分析需要进行正运动学、逆运动学、正动力学、逆动力学等描述。机器人数学模型通常是一些含有关节变量的三角函数的复杂数学公式,显然手工计算多自由度的机器人数学模型需要花费大量劳动,而且容易出错。所以,对机器人运动的分析历来以数值计算为主。但是在数值计算中,直观地了解参数与特性之间的关系存在许多困难,可见显式公式推导对机器人结构的设计、控制器的设计、计算算法的改进是有利的。

20世纪70年代后半期,借助数学公式处理进行机器人分析的研究开始盛行起来^[2],除 Cesareo 的 DYMER^[3]、Murray 的 ARM^[4]、齐藤的 RACER^[6]、Kovacs 的 Rocky-X^[7]之外,还有 Nethry 等开发的 Robotica^[8]、川崎等开发的 ROSAM^[9]等数学公式处理软件。开发这些软件一度以 Lisp 语言为多,近年来大多改用市售的数学公式处理软件。开发的主要目的是自动推导刚性串联杆件机构的动力学模型,不过最近 Khalil 等的 SYMORO⁺^[10]、川崎等的 ROSAM II^[12,13]也可以用来进行树形结构和部分闭链杆件机构的分析,前者以 Mathematica 为基础,后者以 Maple 为基础。此外,以卫星机器人(由弹性杆件组成)^[13]为对象的动力学模型自动生成软件也在研究之中。

5.3.2 机器人数学公式处理系统的研究课题

机器人数学公式处理系统应具有如下功能:

1. 适合多种类型机器人的分析

机器人有各种类型,例如,串联杆件机构机械手、树形结构机器人手部、闭链杆件机构的并联机械手、车轮型移动机器人、腿型步行

机器人、拟人步行机器人、太空浮游机器人、水下浮游机器人等。即使是同一类型的机构,依照杆件和关节是刚性体或柔性体,数学模型也不一样。因此,人们期望开发一种系统能够尽可能多地对不同类型的机器人进行分析,而且被分析的机器人机构组成最好能方便地利用 GUI 来进行设定。图 5.10 的例子就是 ROSAM II 软件系统为设定杆件和关节参数而构建的人机对话图形界面。界面中的参数可以用符号或数值两种方式给出。

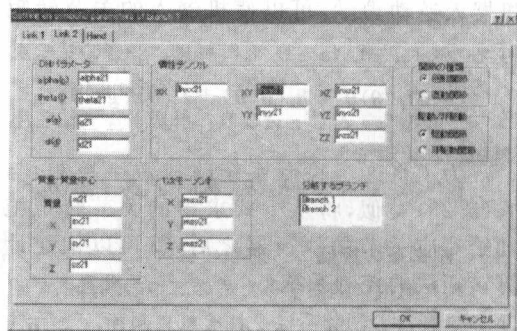


图 5.10 ROSAM II 设定杆件参数的人机对话图形界面

2. 数学模型自动生成

机器人分析,除了正运动学模型、逆运动学模型、正动力学模型、逆动力学模型等基本模型外,还需要诸如基本参数分析、控制输入、闭链杆件机构几何约束等数学模型。推导它们时面临的基本问题是高速矩阵运算、向量运算,以及求解多变量非线性方程。例如,逆动力学问题分析需要在三角函数表达的约束条件下求解多变量非线性联立方程组,如果是闭链杆件机构,还必须推导带几何约束的闭链机构动力学模型。为了在约束条件下处理机器人模型的数学公式,20世纪80年代后期人们开始尝试用 Buchberger 算法^[14]计算多变量多项式的 Gröbner 基底,以便用于机器人逆运动学的求解^[15~17]和结构设计支持系统^[18]。后来又将它拓展到基本参数分析等^[19,20]动力学计算。

3. 优化数学公式

表达多自由度机器人的运动学模型、动力学模型的数学公式非常庞大复杂,需要把它整理成看上去一目了然的式子。另外,机器人的分析和控制也期望通过压缩数学公式

来提高处理的速度。商用软件 Mathematica 和 Maple 中包含一些减少运算次数的数学公式优化命令,但是在用于多自由度机器人的动态模型计算时,与 Luh 等^[21]的逆动力学算法相比,计算量仍有大幅度增加。因此,在多自由度机器人的分析计算中,数学公式的优化占据很重要的研究地位。

有一些措施可以有效地整理数学公式,如减少冗长运算,把同类项设为中间变量,做部分因式分解等。M. A. Breuer 的因式生成算法 (factor generation algorithm)^[22]通过求取多项式集合的公共因式生成计算式的优化代码。田川等在这个基础上提出广义优化方法^[23,24]。川崎等^[12]在 ROSAM II 中嵌入了几乎同样的优化计算。嵌入的算法将 6 种局部优化组合在一起实现了广域的优化。这 6 种局域优化方法是:三角函数变量置换、整理常数乘积之和的卷积、指定因数解除、多个公式中公因式和公因数的提取、部分因式分解等。其结果比 Maple 优化命令更有效,特别是对 4 个自由度以内的机器人逆动力学模型的计算,比 Luh 等的逆动力学算法效率更高,目前对它的进一步改进还在进行中。

4. 与数字仿真的融合

机器人分析不仅需要数学公式处理,而且需要数值分析,将两者融合的计算环境对于系统分析用户而言是很有吸引力的。商用软件 Mathematica 和 Maple 两者的分析能力很强,以它们为基础构建的 SYMORO+ 和 ROSAM II 能够融合双方的特点。不过与专用数值分析系统相比较,数学公式处理系统的数值计算速度相对慢一些。因此,期望将数学公式处理结果能够与数值分析系统链接起来。例如,Maple 就能同数值分析系统 MATLAB 进行链接,为融合提供了可行性。Fisette 等的 ROBOTRAN^[25],虽然未以市售数学公式处理系统为基础,但也能生成数值分析系统 MATLAB 的语句的方式,实现高效的数值计算。

5. C 语言程序自动生成

若能把机器人逆运动学模型和逆动力学模型自动转换成 C 语言或 C++ 语言语句表达,能够简化数值分析和控制装置的编程。在 Mathematica 和 Maple 中已经嵌入了将数

学公式转换成 C 语言语句的功能,不过目前仅处于转换数学公式的初级水平,还不具有 C 语言编程函数化和其他功能,因此仍有待今后的进一步努力。

5.3.3 基于 Gröbner 基底的逆运动学解法

1. Gröbner 基底

有一种利用 Gröbner 基底 (Gröbner basis)^[14]求解逆运动学模型的方法。Gröbner 基底属于一种多变量多项式概念的基底,下面对它的概念做一些简略的介绍。

设 X 为 m 个变量 x_1, x_2, \dots, x_m 的集合, $K[X]$ 为由这些变量组成的域 K 上的多变量多项式的集合。 $K[X]$ 是具有乘法单位元 1 的交换环。含集合 $K[X]$ 的多变量多项式可以表示为

$$f = \sum_{k=1}^m c_k p_k \quad (5.30)$$

式中, c_k 为常数; p_k 为功率积 (power product), 是 m 个变量的幂积:

$$p_k = x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_m^{i_m} \quad (5.31)$$

式中, i_1, i_2, \dots, i_m 为正整数。 $i_1 + i_2 + \dots + i_m$ 称为单项式 $c_k p_k$ 的阶次, 各个单项式的阶次中最高的次数称为 f 的阶次。设由集合 $K[X]$ 中的 n 个元素 f_1, f_2, \dots, f_n 组成的子集为

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (5.32)$$

由 F 生成的理想集合 $\text{Ideal}(F)$ 可以定义如下:

$$\text{Ideal}(F) = \left\{ \sum_{k=1}^n u_k f_k \mid u_k \in K[X] \right\} \quad (5.33)$$

这时称 f_1, f_2, \dots, f_n 为理想基底 (ideal basis)。对多变量多项式 $f_1, f_2, \dots, f_n \in K[X]$ 规定序 (order) (用符号 $<$ 表示), 基于序将它规定置换成多变量多项式 $h \in K[X]$ 。单项式之间序的规定有两种: 一种按照总阶次的序 (total degree order) (例如, $1 < x < y < x^2 < xy < y^2 < x^3 < x^2y < xy^2 < y^3 < \dots$); 另一种按照编排词典的序 (lexicographic order) (例如, $1 < x < x^2 < x^3 < \dots < y < xy < x^2y < \dots < y^2 < xy^2 < \dots$)。这里, 我们用总阶次的序来进行说明, 它的优点在于表达式比较简洁。

考虑 $X = \{x, y\}$, $f_1 = x^2y^2 - 1$, $f^2 = x^2 + y^2 - 1$, $h = x^3y^6$ 的例子。首先, 由 $f_1 = 0$, 置换成 $x^2y^2 \rightarrow 1$, 得到 $h \rightarrow_f xy^4$ 。称这样的操作为简化 (reduction), 称 $x^2y^2 \rightarrow 1$ 为简化规则 (re-

duction relation)。符号 \rightarrow_{f_i} 表示用 f_i 构成的简化规则对 h 简化的结果。这个式子已经无法进一步简化,称这种无法再简化的式子为正规型(normal form)。另外,由 $f^2=0$ 得到简化规则 $x^2 \rightarrow 1-y^2$,用它进行置换得到 $h \rightarrow_{f_i} xy^6-xy^8$ 。这个式子也不能再简化了,所以它同样属于正规型。在这个多变量多项式的例子中,由理想基底简化得到的正规型与简化的过程有关,故它不是唯一的。Buchberger^[14]展示了从给定的理想基底求取Gröbner基底,再提供Gröbner基底简化求得正规型的算法。由Gröbner基底求得的正规型是唯一的(合并性),而且一定能够用有限的简化到达正规型(停止性)。这种兼备合并性和停止性的基底被称为完备(complete)的基底。Buchberger算法是一种多变量多项式的完备算法,对任意的 f_1, f_2 定义多变量多项式

$$S_{\text{poly}}(f_1, f_2) = \frac{L_{cm}(L_{m1}, L_{m2})}{L_{m1}} f_1 - \frac{L_{cm}(L_{m1}, L_{m2})}{L_{m2}} f_2 \quad (5.34)$$

可通过把 S_{poly} 加到底层中实现完备化。式中, L_{m1} 表示单项式 f_i 中序最高的单项式, $L_{cm}(L_{m1}, L_{m2})$ 是 L_{m1} 和 L_{m2} 的最小公倍数。在前述例子中,从 $S_{\text{poly}}(f_1, f_2) = f_1 - y^2 f_2 = -y^4 + y^2 - 1 \equiv f_3$ 可以获得新的简化规则 $y^4 \rightarrow y^2 - 1$ 。应用它,前面的正规型变成 $xy^4 \rightarrow_{f_i} xy^2 - x$,再次应用后,后者的正规型变成 $xy^6 - xy^8 \rightarrow_{f_i} xy^2 - x$,即唯一的正规型。也就是说,采用3种简化规则 $\{x^2 y^2 \rightarrow 1, x^2 \rightarrow 1 - y^2, y^4 \rightarrow y^2 - 1\}$ 后,任意多变量多项式 $h \in K[X]$ 变成唯一的正规型。把对应于新简化规则的多变量多项式加到原来的理想基底上进行完备后,称之为Gröbner基底。在Gröbner基底中最小的基底叫做简化Gröbner基底(reduced Gröbner basis)。在本例中,简化Gröbner基底的集合 G 可以表示为 $G = \{x^2 + y^2 - 1, y^4 - y^2 + 1\}$ 。Buchberger给出了从理想基底计算简化Gröbner基底的算法。下面我们把简化Gröbner基底简称为Gröbner基底,它具有以下有用的性质:

① 联立方程 $f_i = 0 (i=1, \dots, n)$ 的解,就是将多变量多项式集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 的所有元素设为零的变量组(称其为 F 的零

点)。 F 的零点与从 F 求得到的Gröbner基底 G 的零点相等。

② 当取编排词典的顺序作为多项式之间的序规则时,Gröbner基底与变量 X 有关,且可以表示成如下金字塔形式:

$$G = \left\{ \begin{array}{c} g_1(z_1) \\ g_2(z_1, z_2) \\ \vdots \\ g_n(z_1, z_2, \dots, z_m) \end{array} \right\}$$

式中, z_i 为 $x_j (j=1, \dots, m)$ 中的一个元素。

③ 将多项式之间的序固定,以Gröbner基底为基础简化包含 $K[X]$ 任意形式的多项式,所得到的正规型是唯一的,通过有限次简化肯定可以求得该多项式的正规型。

2. 求解逆运动学问题

所谓逆运动学(inverse kinematics)问题,即从机械手部给定的位置姿态求解各个关节相应的位置变化。求解由正运动学求得的运动学方程,就是求解逆运动学的问题,但运动学方程式都是一些含有关节变量的三角函数的非线性联立方程,找出它的解析解非常困难。文献[15~17]解释了Gröbner基底求解逆运动学模型的方法。为了简化讨论,设机器人仅由 n 个转动关节构成,用齐次变换矩阵表示基座坐标系中的手部位置姿态如下:

$${}^{\text{Base}}T_{\text{hand}} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & -s\theta & c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & p_x \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & -s\theta & c\phi s\psi & 0 & 0 & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & p_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi c\psi & p_z & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

式中, ϕ, θ, ψ 为Z-Y-X欧拉角; p_x, p_y, p_z 为手部位置; $s\theta, c\theta$ 分别为 $\sin\theta, \cos\theta$ 的缩写。此外,用手部关节变量的向量 $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$,可以把齐次变换矩阵表示成 ${}^{\text{Base}}T_{\text{hand}}(q)$ 。这时,若将第1行与第3行的各个元素进行置换,可以得到12个方程式。若剔除其中重复的和已知的方程式,则方程式的数目会少于12个,结果得到 s 个方程式 $f_i = 0 (i=1, \dots, s)$ 。这些方程式中均含有三角函数,对转动关节变量做以下变量变换:

$$\sin\theta_i = sq_i, \cos\theta_i = cq_i \quad (i=1, \dots, n)$$

可以得到下面的多变量多项式集合:

$$f_i(sq_i, cq_i, \dots, sq_n, cq_n) = 0 \quad (i=1, \dots, s) \quad (5.36)$$

附加两个变量 sq_i, cq_i 的约束方程

$$sq_i^2 + cq_i^2 - 1 = 0 \quad (i=1, \dots, s) \quad (5.37)$$

得到多变量多项式集合 F 。接下来,对集合 F 采用 Buchberger 算法,按照词典编辑顺序对多项式进行排序,得到如下金字塔形式的 Gröbner 基底:

$$G = \left\{ \begin{array}{c} g_1(x_1) \\ g_2(x_1, x_2) \\ \vdots \\ g_{2n}(x_1, x_2, \dots, x_{2n}) \end{array} \right\} \quad (5.38)$$

式中, $x_j (j=1, \dots, 2n)$ 表示 $sq_i, cq_i (i=1, \dots, n)$ 中的任意一个。根据 Gröbner 基底的性质,运动学方程式(5.36)、式(5.37)的解与由式(5.38)给出的 Gröbner 基底 G 的零点一致。在求取金字塔形式的 Gröbner 基底时,可以依照变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的序,化解成单变量多项式求解,这样就比求解式(5.36)、式(5.37)容易。不过一般来说,当单变量多项式的阶次高于5次方后就没有解析解了。这时需要与数值分析方法结合起来求解。

5.3.4 基本参数的分析

构成机器人的每一根杆件都有质量、一阶矩、惯性张量等10个动力学参数。不过,这些动力学参数并非都要出现在运动方程式中。描述运动方程式必需的最小动力学参数的集合称为基本参数(base parameters)^[26]或最少动力学参数(MDP: Minimum Dynamic Parameters)^[27]。给定基本参数的途径有两条:一条是从机器人机构的几何学条件求取^[26~29];另一条是采用回归量求解运动方程式参数^[20,30~32]。回归量方法就是检查回归量的列向量是否与线性无关,消去与线性相关的向量对应的参数,然后重新组成矩阵。这种方法对任意机器人机构都适用。虽然通过数值分析方法也能分析线性相关性,但会受到数值计算误差的影响。下面阐述数学公式处理的方法。

1. 回归量分析法^[31,32]

设杆件 i 的质量为 m_i , 一阶矩为 $ms_i = (ms_{ix}, ms_{iy}, ms_{iz})^T$, 惯性张量为 $I_i = \{I_{ijk}\}$, 以这些元素定义杆件 i 的动力学参数向量得到

$$\sigma_i = (m_i, ms_{ix}, ms_{iy}, ms_{iz}, I_{ixx}, I_{ixy}, I_{ixz}, I_{iyy}, I_{iyz}, I_{izz})^T \in R^{10}$$

则 N 个杆件组成的整个机器人的动力学参数向量可以表示为 $\sigma = (\sigma_1^T, \sigma_2^T, \dots, \sigma_n^T)^T$ 。于是,机器人运动方程式可表示成以下参数向量的线性关系^[33]

$$\tau = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\sigma \quad (5.39)$$

式中, $\tau \in R^n$ 为关节力/转矩向量; $W = (w_1, w_2, \dots, w_{10n}) \in R^{n \times 10n}$ 为参数 σ 的回归量(regressor); w_i 为其第 i 列向量。基本参数可以按如下的方式求得:观察式(5.39)中所有向量 w_i 的线性无关性,在消去其中线性相关向量的同时,把与线性相关向量对应的动力学参数合并到其他参数里。设回归量的 i 个初始向量 w_1, w_2, \dots, w_i 是线性无关的,观察第 $i+1$ 列向量 w_{i+1} 是否能用它们的线性组合来表示,若线性相关,则可以表示为

$$w_{i+1} = \sum_{j=1}^i k_j w_j$$

将它带入式(5.39)消去 w_{i+1} 后得到

$$\tau = \sum_{j=1}^i (\sigma_j + k_j \sigma_{j+1}) w_j + \sum_{j=i+2}^n \sigma_j w_j$$

于是从参数向量和回归量中逐一消去 σ_{i+1} 和 w_{i+1} , 使参数向量 σ 和回归量 W 得到更新。经过如此反复处理,直到回归量 W 的全部列向量都线性无关,便得到基本参数。

回归量的各个元素均为时间的函数。在某一时刻,各列向量或是线性无关或是线性相关,至于以时间函数为元素的向量,只要它不是始终线性相关,就将之视为线性无关。这就是判别以时间函数为元素的向量是否为线性无关的原则。现假定给出 $s+1$ 个 n 阶函数向量 $x_1, x_2, \dots, x_s, y \in R^n$, 并且假定前面的 s 个向量线性无关,后面第 $s+1$ 个向量是线性相关,则表示成

$$y = \sum_{i=1}^s k_i x_i \quad (5.40)$$

于是欲判别函数向量的线性无关性,只需观察是否存在以系数 k_i 为元素的向量 k 即可。但是,由于 $x_i (i=1, \dots, s)$ 是以时间函数为元素的向量,故直接判定 k 是否存在有一定困难。此时可导入以下基本函数:

【定义】对于某函数向量集合,满足以下条件的函数称为该函数向量集合的基本函数:

① 基本函数是由独立变量和它们的时间

微分组成的单调函数,不含因变量。

② 任意一个基本函数无法用其他基本函数的线性组合来表示。

③ 含在函数向量集合中的任意一个元素通常都可以表示成该集合基本函数的线性组合。

根据这个定义,假设表示 $s+1$ 个函数向量 x_1, x_2, \dots, x_s, y 需要 r 个基本函数组 $\{f_1, f_2, \dots, f_r\}$ 。若定义基本函数向量 $f = (f_1, f_2, \dots, f_r)^T$, 则可以表示成

$$\begin{aligned} y_j &= a_j^T f \\ x_{ij} &= b_{ij}^T f \quad (i=1, \dots, s; j=1, \dots, n) \end{aligned} \quad (5.41)$$

式中, $a_j, b_{ij} \in R^r$ 为常数向量。将式(5.41)代入式(5.40)中,抽出其中第 j 个元素得到

$$a_j^T f = \sum_{i=1}^s k_i b_{ij}^T f$$

上式对任意时刻的 f 均成立,故可以消去等式两边的 f 得到

$$a_j = \sum_{i=1}^s k_i b_{ij}$$

若再假设

$$a = (a_1^T, a_2^T, \dots, a_{nr}^T)^T \in R^{nr},$$

$$\beta_j = (b_{j1}^T, b_{j2}^T, \dots, b_{jn}^T)^T \in R^{nr},$$

$$B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \in R^{nr \times (s+1)}$$

可得到

$$B \begin{bmatrix} k \\ -1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5.42)$$

因此,如果存在满足式(5.42)的向量 k , 那么这 $s+1$ 个向量 x_1, x_2, \dots, x_s, y 线性相关。向量 k 存在,故可以使用高斯-约当法将式(5.42)中矩阵 B 的右上方三角矩阵变形为下式进行求解。

$$\begin{bmatrix} I & a_1^* \\ 0 & a_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ -1 \end{bmatrix} = 0$$

显然,若 $a_2^* = 0$, 可得 $k = a_1^*$, 于是由于 k 存在,向量集合线性相关。若 $a_2^* \neq 0$, 由于等式矛盾, k 不存在,故可以判定向量集合线性无关。由于矩阵 B 是常数矩阵,通过高斯-约当法它很容易被变换成三角矩阵。

2. 基于 Gröbner 基底的分析

在适当的关节处假想将机器人闭链机构切开,成为一个假想树状结构机器人,然后对该假想树状结构机器人的运动方程附加闭链机构几何约束,于是可以求解闭链机构机器

人的运动方程式。设闭链机构机器人和假想树状结构机器人的广义变量分别为 q, q_0 , 那么闭链机构机器人的几何约束不一定以显式 $q_0 = q_0(q)$ 的形式给出,一般多以如下隐式的形式给出:

$$f(q, q_0) = 0 \quad (5.43)$$

此时考虑再增加约束条件的一次微分和二次微分,即 $\dot{f}(q, q_0) = 0, \ddot{f}(q, q_0) = 0$, 附加了这些约束条件后,有必要对回归列向量的线性无关性做一番分析。下面介绍用 Gröbner 基底分析线性无关性的方法^[20]。

考虑转动关节 q_i , 针对约束及其微分约束集合 $F = \{f, \dot{f}, \ddot{f}\}$ 、回归量矩阵 W 的各个元素实施在前述逆运动学小节中提及的变量变换 $\sin \theta_i = sq_i, \cos \theta_i = cq_i (i=1, \dots, n)$, 其中 n 为机器人的转动关节数。结果,约束集合 F 和回归量的各个元素都被表示成 sq_i, cq_i 的多变量多项式。此外,对约束集合 F 再附加两个变量 sq_i, cq_i 的限定关系式 $sq_i^2 + cq_i^2 - 1 = 0$ 。然后求取约束集合 F 的 Gröbner 基底,简化 W 的各个元素,在约束条件下求得回归量的最简洁表示形式。由于从 Gröbner 基底简化得到的基本函数具有线性无关的性质,所以对经过简化的回归量而言,前述回归量分析法是有效的,即使面对复杂的闭链机构,机器人也能求解得到基本参数。不过,为了求解 Gröbner 基底,常常必须根据机器人机构确定需要多少计算时间和多大的计算机内存。

川崎晴久

5.4 模型与图形学

机械产品的功能往往与形状有关。与机械产品形状相关的信息对产品的设计、特性、行为分析、制造等都是不可缺少的。在机器人动作仿真和规划中,需要检测机器人与环境的干涉,以便进行避障等。无论是在机器人和环境形状预先给出的场合,或者是用视觉等传感器观测的场合,形状的表现方法及其处理都非常重要。

5.4.1 三维形状的表达^[2,3,9]

实体模型(solid model)可以在计算机上完整地表现物体的形状。三维形状具有广泛的用途,但仅用顶点、棱边等表现形状的线框

模型(wireframe model)和用平面表现形状的表面模型(surface model)是不够充分的。实体模型之所以不可缺少,是因为它既能表现立体在空间内占有的部分,也能提取形状的全部信息。实体模型的表现方法大致有三种,即 CSG、边界表示、空间分割表示。

1. CSG

构造实体几何(CSG; Constructive Solid Geometry)是通过基本体素的组合表现任意形状的结构。基本体素包括立方体、圆柱、圆锥等,它们在数学上用半空间的组合来表现,再用若干个参数表示它们的尺寸大小。例如,圆柱可以表现成由半径和高度决定的圆柱面内部的半空间与由上平面和下平面分割出的半空间的组合。这些基本体素可进行求并、求差、求交等集合运算,以及通过平移、转动等构成任意形状的立体。图 5.11 用二叉树结构表现了立体的构成方法。叶节点处为结构的基本体素,中间节点是对子树所表示的立体施以集合运算,树根就是要表示的立体。

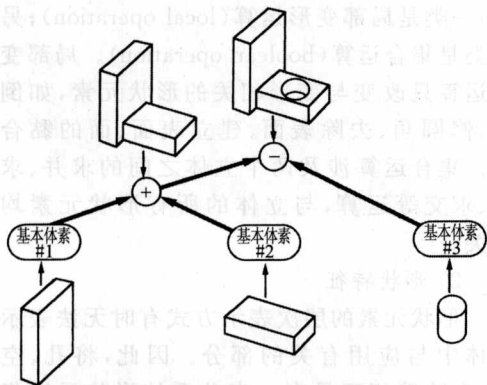


图 5.11 CSG 树结构

CSG 方法占用计算机内存容量较少,运算简单。在有关形状的问题上,反复沿 CSG 树进行观察,发现不少问题它都能简单地找出解。它的缺点是无法清楚地表现立体棱边之类的形状元素,每逢需要形状要素信息的时候都必须对形状做出评价。

2. 边界表示

边界表示(boundary representation)是指用构成立体边界的表面、棱边、顶点表示立体。为了将各种形状元素组合起来表示形状,必须有它们的几何信息(例如,平面的方

程式、棱边方程式、顶点坐标等),以及表示形状元素之间连接关系的拓扑信息。拓扑信息有面、棱边、顶点,以及环(loop,在面内相邻关系下能搜寻到的棱边的集合)和壳(shell,在相邻关系下能搜寻到的面的集合)等数据结构。环可以分为两种:构成面的外周的棱边群和构成穴的棱边群。为隐含地表示面的表、里,环内的棱边应该从立体外部观察反时针方向绕面的周围排列。外壳可以区分为构成表面的面群和构成空洞的面群。将立体的拓扑信息和几何信息汇总后可以表示成如图 5.12 所示的数据结构形式。这样的层次表示形式能检索到构成立体的任意形状元素。

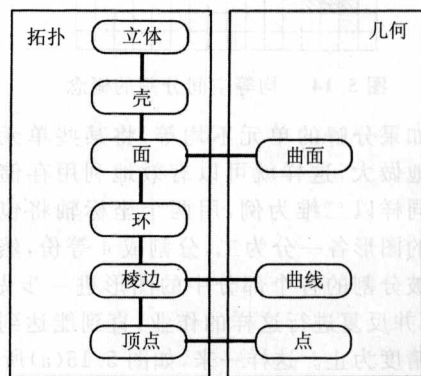


图 5.12 立体的形状结构

进一步整理和表示棱边周围的拓扑信息能够简化对立体的运算。如图 5.13 所示,棱边周边的拓扑关系是两个端点、两个侧面的环、各环中有关后一条棱边和前一条棱边的信息。这样的数据结构叫做翼边结构(winged edge structure)。

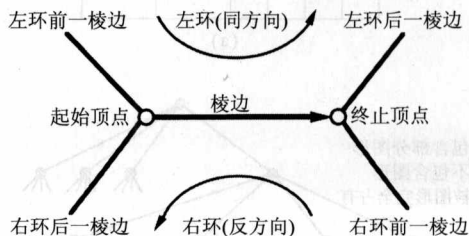


图 5.13 翼边结构

3. 空间分割

空间分割(cell decomposition)指依据一定规则将空间分解成若干个小元素(单元),用其中的立体占有单元表示立体的方法。最

简单的空间分割就是把单元看成立方体,将空间进行等间隔的分割。以单元中的一点为代表点记录立体中所含单元的坐标。图 5.14 以二维为例解释了这种空间分割方法表示的概念。这种表示的近似程度与单元的尺寸大小有关,需要一定的存储容量,如果改成三维,分解的单元数将按立方的比例增加。

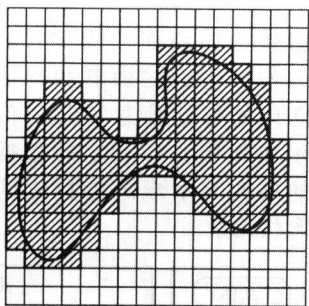
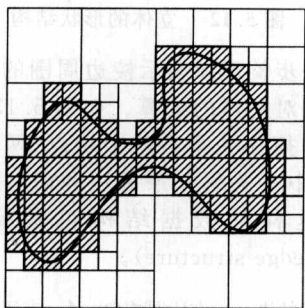
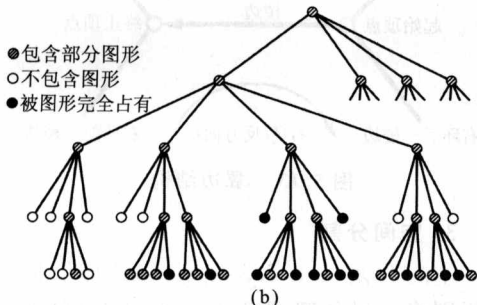


图 5.14 均等空间分割的概念

如果分解的单元不均等,将某些单元尽可能地做大,这样就可以有效地利用存储空间。同样以二维为例,用两个坐标轴将包含对象的图形各一分为二,分割成 4 等份,然后再将被分割的各个部分中的图形进一步做 4 等分,并反复进行这样的作业,直到能达到足够的精度为止。这样一来,如图 5.15(a)所示



(a)



(b)

图 5.15 二维图形的二叉树表示

就仅仅针对必要的区域用足够细小的单元表示出来。这种分割信息可以用图 5.15(b)所示的树结构来表示。在二维条件下称为二叉树(quadtrees),在三维条件下称为八叉树(octree)。八叉树表示所需的存储容量与立体的表面积成正比。

主要的实体模型大多数是基于边界表示的。为了让 CSG 能满足各种应用,同样需要对形状元素进行处理。有时对一些特殊的应用场合单元进行分解很有效。

4. 实体模型制作器及其功能

基于实体模型可以实现立体形状的生成、变更等运算。计算机内生成、运算三维立体形状的系统被称为实体建模系统或实体模型制作器(solid modeler),它是三维形状设计 CAD(Computer Aided Design)、分析用 CAE(Computer Aided Engineering)和生成制造信息的 CAM(Computer Aided Manufacturing)等系统的核心。

1) 形状运算

变更实体模型形状运算大致可以分为两类:一类是局部变形运算(local operation);另一类是集合运算(boolean operation)。局部变形运算只改变与变形相关的形状元素,如倒角、修圆角、去除表面、建立表面、面的黏合等。集合运算涉及两个立体之间的求并、求差、求交等运算,与立体的所有形状元素均有关。

2) 形状特征

形状元素的层次表示方式有时无法表示立体中与应用有关的部分。因此,将孔、空穴、台阶等相互具有一定关系的形状元素集合称为形状特征(form feature)。形状特征信息包括种类、决定具体形状的参数、在立体内的位置与姿态等。根据应用场合的不同,有时种类与结构等形状特征还包括一些与应用、运算有关的附属信息。

3) 参数(parametrics)功能^[8]

参数功能是指设计过程中在改变部分形状的情况下,仍然必须维系的形状元素之间应有的几何制约(以保持其他形状不变)的一种功能。例如,把切线关系、正交关系、平行关系、长度尺寸、角度大小等制约关系与形状关联起来,即使某种尺寸发生变化,也能在制

约关系的整合下调整全体形状结构。求解各种约束关系构成的联立方程式是最基本的参数功能。如果用图形表示约束关系,可以通过简化图形的方式设法减少计算量。

5.4.2 形状处理

下面稍微详细地叙述在实体模型制作器中处理三维形状时所依据的形状处理方法。

1. 齐次坐标变换

用三维形状元素表示物体的位置与姿态时通常用到齐次坐标(homogeneous coordinate)和齐次坐标变换(homogeneous transformation)。齐次坐标变换的优点是可以相同的形式处理任意的移动,包括旋转移和平行移动,即简单的移动组合能表示复杂的移动。不过,将在形状处理中用到的齐次坐标变换应用到机器人机构学计算时多以转置的形式出现,此时应该特别注意它与矩阵相乘的次序。

如图 5.16 所示,在实体模型制作器中,各个立体有固有的坐标系 P ,以及该坐标系变换到世界坐标系 W 的转换矩阵 ${}^W T_P$ 。属于立体形状元素的几何信息,如顶点 Q 的坐标是相对于立体坐标系 P 的变换矩阵 ${}^P T_Q$,那么顶点相对于世界坐标系 W 的坐标 ${}^W T_Q$ 可以由 ${}^P T_Q {}^W T_P$ 求得。这样一来,立体的移动只需要变换 ${}^W T_P$ 就可以实现。在装配作业中,也可以设置固定坐标系,再附加装配零件-零件之间的变换,这样就可以处理整个装配零件的装配过程。

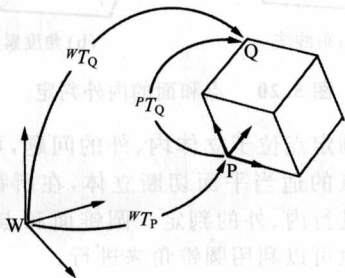


图 5.16 立体的坐标系

2. 形状元素的表示

在大多数情况下,用参数形式($x=f_x(t)$, $y=f_y(t)$, $z=f_z(t)$)表示点、线段、曲线、平面、曲面等几何学信息。点可以采用前述齐次坐

标表示,线段可以用随时间参数 t 从 0 增加到 1,点 $q(t)$ 的向量从线段初始点 p_1 移动到终点 p_2 的形式表示。圆、椭圆、抛物线等二次曲线也同样可以依据它们的形状分别实现参数化。至于平面,则可以用其上一点 p 和沿平面的两个正交向量 l 和 m ,并以两个参数 u 和 v 作为 l 和 m 的系数予以表示。不同类型的二次曲面同样可以实现参数化。至于自由曲线和曲面的表示问题将在本小节末尾处叙述。

3. 拓扑运算^[3]

我们平时所处理的立体,在数学上称为流形(manifold),它的拓扑元素之间存在欧拉-泊安卡勒公式(Euler-Poincare formula)的关系

$$v - e + f - (l - f) - 2(s - g) = 0 \quad (5.44)$$

式中, v 为顶点数; e 为棱边数; f 为表面数; l 为环数; s 为壳数; g 则被称为 genus 数,代表贯通孔的数目。只要不采用破坏式(5.44)关系的运算,就不会出现拓扑关系矛盾的立体。这样的拓扑运算称为欧拉运算(Euler operation)。图 5.17 表示了欧拉运算的例子。欧拉运算有逆运算。适当选择欧拉运算组合能构成任何与之相应的立体拓扑构造。

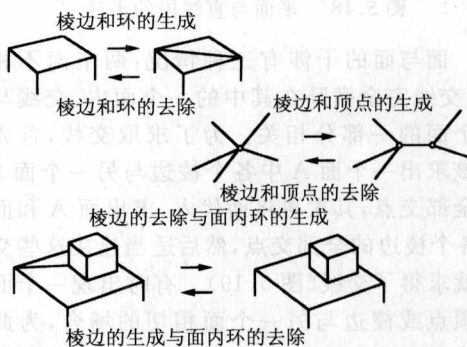


图 5.17 欧拉运算的例子

用棱边或顶点连接的立体不属于流形,不能使用通常的边界表示和处理。处理这类非流形(non-manifold)的拓扑运算也正在研究之中^[2]。

4. 几何运算^[2,4]

1) 干涉检查

进行集合运算时必须检测立体双方以怎样的形状元素相交。干涉计算是机器人仿真

的一个重要组成部分。下面叙述多面体干涉的计算顺序。曲面时的基本流程也是一样的。

当与面和直线段干涉时,首先应该求得该面平面与直线段的交点。求得交点的方法有方程式法和向量法两种。前方法是求解平面表达式和直线表达式的联立方程式,位于直线段上的、实解形式的参数值即为所求的交点。后方法如图 5.18 所示,如果将平面上的一点与直线段两端连接的向量与平面法线向量的内积符号不同,表明有交点存在。该交点可以用内积之比内分指向两个端点向量即可求得。即使直线段与平面干涉,直线段也未必与面相交。平面与直线段交点的内外判定,可以采用本小节稍后的 2. 中所讲解的方法,只有位于面中的交点才是面与直线段真正的交点。

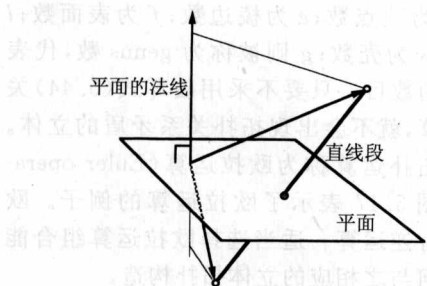


图 5.18 平面与直线段的干涉

面与面的干涉有三种情况:两个面不相交、交线完全横卧在其中的一个面内、交线与两个面的一部分相关。为了求取交线,首先应该求出一个面 A 中各个棱边与另一个面 B 的全部交点,其次再将面代入,求出面 A 和面 B 各个棱边的全部交点,然后适当连接这些交点就求得了交线(图 5.19)。有时出现一个面在顶点或棱边与另一个面相切的场合,为此应检查交点周边的面和棱边的位置关系及方向,然后对相交方式进行分类。

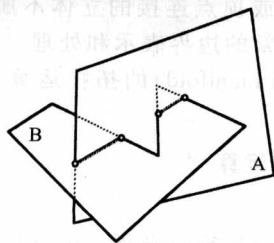


图 5.19 面与面之间的干涉

研究立体与立体的相交,需要从总体上观察一个立体的各个面与另一个立体的各个面的干涉。连接所得的各条交线就可以得到立体和立体之间的交线。立体的面不一定全部与另一个立体发生干涉,所以在进行面与面的干涉计算前,通常要进行粗略的校验(rough check),去除那些不可能干涉的面。观察立体之间干涉的方法有两种:一种方法是以面内相距最远的两个顶点的连线为直径做面的包络球,观察包络球之间的干涉;另一种方法是选出面中顶点各个坐标轴的最大值与最小值,做成含有面的长方体,观察长方体之间的干涉。

2) 内外判定

有几种判定一个点在面内或面外的方法。第一种方法是求外积法。假设面是凸多角形面,求取从对象点到凸多角形面各个顶点的向量,以及沿面的棱边的定向向量,然后求外积。若环绕面一周,外积的方向不变,那么对象点就在面内。第二种方法是射线法。从对象点延伸出射线,如果射线和面的外周相交的次数是偶数,则对象点位于面的外侧。第三种方法是角度累加法。计算从对称点引向相邻两个顶点的向量之间的夹角。对所有的角度,包括正、负符号在内做累加,如果总和是 2π ,则对称点在面的内部(图 5.20)。

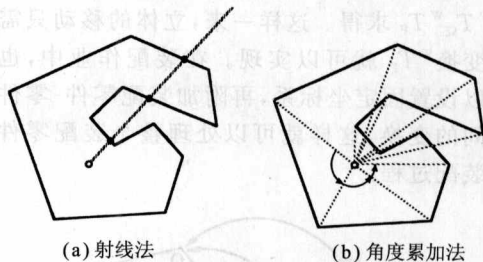


图 5.20 点和面的内外判定

要判定点位于立体内、外的问题,可以用通过该点的适当平面切断立体,在所截出的平面内进行内、外的判定。圆锥面和点的内、外判定也可以利用圆锥角来进行。

5. 曲线与曲面^[4]

除去直线、二次曲线(圆、椭圆、抛物线、双曲线等)之外,还有用参数(近似)表示任意曲线的自由曲线。关于它们的表示方法曾经在很多研究中提及,这里仅以三阶贝塞尔曲线(Bezier curve)的表示方法为例予以说明。

$$\begin{aligned}
 R(t) &= \sum_{i=0}^3 B_i^3(t) P_i \\
 &= \sum_{i=0}^3 \frac{3!}{(3-i)! i!} t^i (1-t)^{3-i} P_i
 \end{aligned}
 \quad (5.45)$$

图 5.21 中 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 的 4 个点称为贝塞尔曲线控制点。贝塞尔曲线的起点(参数 $t=0$)为 P_0 , 起点的切线与线段 P_0P_1 重合。 $t=1$ 时对应曲线的终点为 P_3 , 该点的切线与线段 P_2P_3 重合。贝塞尔曲线包含在控制点形成的四边形 $P_0P_1P_2P_3$ 中。控制点的配置可以控制曲线的形状, 具有切线性质的贝塞尔曲线能够以连接点为中心把 3 个控制点排列在一条直线上, 并平滑地连接起来(图 5.21)。

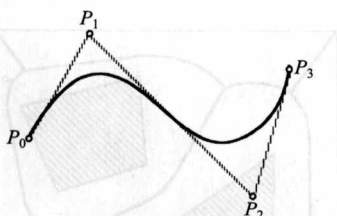


图 5.21 贝塞尔曲线

贝塞尔曲面(Bezier surface)(图 5.22)可以通过两个参数 u 、 v 用下式表示:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_i^3(u) B_j^3(v) P_{ij} \quad (5.46)$$

这个曲面可以用某些参数表示的贝塞尔曲线, 沿着另一些参数表示的贝塞尔曲线进行扫描而获得。用 16 个控制点控制贝塞尔曲面的形状就可以继续保持贝塞尔曲线的性质。彼此相邻的贝塞尔曲面, 可以由边界上贝塞尔曲线的各个控制点将两个侧面的控制点排列在一条直线上, 并平滑地连接。

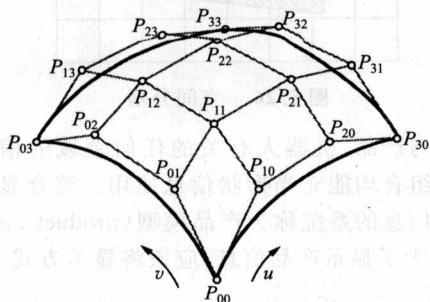


图 5.22 贝塞尔曲面

其他表示自由曲线和自由曲面的方法还有 B 样条、NURBS 等方法, 它们都有各自的应用场合。包含自由曲线、自由曲面的立体, 在形状处理方面非常复杂, 求取它们的交叉需要通过高阶数值计算才能实现。拓扑的处理同样十分复杂。

5.4.3 三维图形学^[1,6]

用实体模型可以表示物体的三维形状。在二维画面上表示三维形状所进行的变换称为投影变换(projection transformation)。有很多种投影变换的方法, 这里仅以常用的轴测投影变换为例予以说明。投影面坐标系以与视线(从视点, 即双眼所在的位置向注视前方的所谓视心引直线)反方向的向量为 z 轴, 以沿投影面向上的向量为 y 轴。将立体坐标从世界坐标系向投影面坐标系做坐标变换, 由此在 xy 坐标系里描述出来的图形就是投影图形。因此, 只要对各条棱边两端顶点的坐标进行投影变换就可以了(图 5.23)。

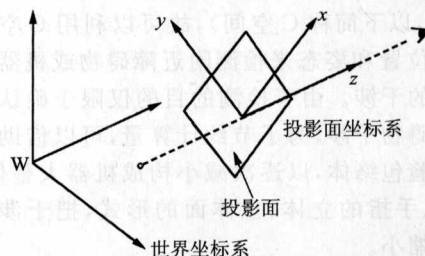


图 5.23 世界坐标系与投影面坐标系

变换到投影面的空间称为视见体(view volume)。在平行投影的场合它为沿视线方向的长方体形, 在透视投影的场合它为以视线为中心轴的台锥形。把视见体内的图形保留下来, 去除其余部分的运算称为裁剪。

从视点看过去, 对遮挡部分不予描述的处理称为隐藏面和隐藏线消除(hidden line/surface removal)。如果是凸多面体, 法线与视线向量之间夹角小于 90° 的形状面(表示朝向视点反方向的面)就可以不显示, 但是, 如果形状中有穴或凹陷部分, 或者是多个立体, 由于可能出现某个面部分遮挡其他面的情况, 故应该在投影后再检查面与面的交叉。如果是曲面, 就必须进行更加复杂的处理, 如

计算轮廓线(与视向相关的外形线)。除了用棱边描述线条之外,还有一些其他的表示面的方法, z 缓冲器法(z buffer method)就是其中之一。所谓 z 缓冲器法,就是在沿画面像素相应的视线做投影变换后,计算各个面的 z 坐标,描述最贴近眼前的面(离视点最近)的方法。还有一种所谓的光线追踪法(ray tracing method),它求取与画面像素相应的视线和立体面的交点,依据交点的材质或反射率求出这些像素的色调,进而从这些点延伸反射光和折射光与其他面进行相交,按同样的方式求出色调并反复进行同样操作,结果得到了与实际情况相近的画像。近年来,有人还开发了一种所谓的 radiosity 法(radiosity method),它不仅使用反射和折射,而且通过传热学计算封闭立体空间的能量平衡,以获得立体的真实视图。

5.4.4 利用形状信息的实例^[7]

在机器人动作规划中实体模型有时被用来检测障碍物的干涉。由于以机器人自由度为轴可以形成所谓的构形空间(configuration space,以下简称C空间),故可以利用C空间内的位置和姿态来检测附近障碍物或机器人自身的干涉。由于检测的目的仅限于确认有无障碍物干涉,为了节约计算量,可以借助粗糙校验包络体,以逐次减小构成机器人整体、手部、手指的立体、立体面的形式,把干涉的部分缩小。

若给定C空间的初始点、目标点以及障碍物,可以用下面的方法求出避障轨迹。如图5.24所示,当二维C空间存在多角形障碍物时,采用可视图(visibility graph)法,从障碍物所有顶点的连线可以找出避障轨迹。也可以采用图5.25所示的博罗诺依图(Voronoi diagram)法,将障碍物与空间边缘的等距离点连接起来求出避障轨迹。如果障碍物是多角形,障碍物可以由直线和抛物线构成,那么前述的空间分割法仍然适用。如图5.26所示,依据空间分割法作出不含障碍物的相邻单元连通图,就能发现从初始点所在单元到目标点所在单元的路径。这种方法不仅在C空间,而且在实际空间中也能用来生成移动机器人的运动轨迹。还有一种生成路径的方法是设想有所谓的人工势场(potential field)。

假设起点的势能高,目标点的势能低,机器人将向势能低的方向进行移动。在障碍物运动,或者障碍物的位置和形状必须靠传感器观察的场合,这种方法可以实时确定机器人的运动。不过,该方法可能出现陷入势能局部极小的危险处境。

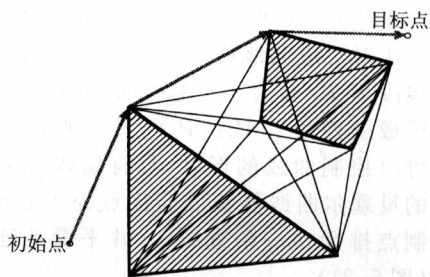


图 5.24 可视图

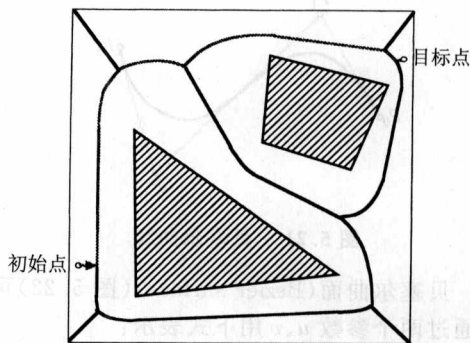


图 5.25 博罗诺依图

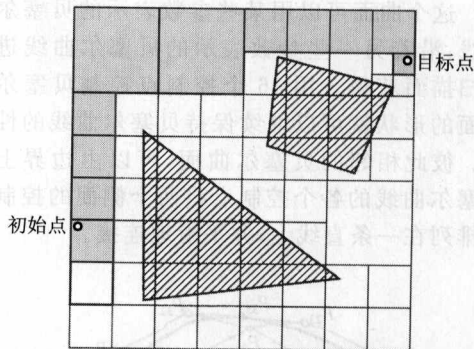


图 5.26 空间分割

与产品、机器人有关的任何领域的信息及其组合均能充当形状信息使用。综合显示这些信息的系统称为产品模型(product model)。为了显示产品信息,应该将显示方式、产品材质、装配结构管理、尺寸、公差、机构等信息综合成一个统一的形状信息加以管理和显示。交换和共享产品模型信息的国际标准已

经公布^[10]。有关的机器人动力学信息和传感器信息也被纳入综合的信息范畴内。例如,基于多自由度人体模型的人的动作仿真已经被实现了^[11]。

平冈弘之

5.5 编程仿真技术

5.5.1 动作仿真

1. 离线仿真

编程是机器人最主要的操作方式。编程操作,尤其是当机器人在未知环境中运动时,是无法事先对程序加以校验的。因此,事先让仿真动作运行起来,把程序动作调整好是十分必要的,生产现场对这种离线编程系统(off-line programming system)的需求很迫切。一般说来,离线编程系统从计算机辅助设计(CAD)系统获得零部件数据,再通过机器人的动作图形仿真加以确定或修改。离线仿真(off-line simulation)的功能包括确定机器人朝向目标点的动作、运动轨迹、碰撞检测、确认机器人之间的同步动作、估计动作时间等^[1]。这些功能在喷漆、焊接等工业机器人的应用中都有需求。近年来,由于个人计算机性能的提高,人们正在开发适合PC机的简易机器人示教系统^[2],这对机器人在中、小企业的应用有推动作用。

2. 在线仿真

与离线编程系统相反,近年来在线仿真(on-line simulation)越来越受到人们的关注。它的特点是在机器人做实际运动时进行仿真,其结果又反馈回机器人的实时动作。对于不可事先预测的事件离线仿真是无能为力的,只有靠在线仿真。在线仿真必须在机器人发觉面临危险状态之前的有限时间内调整动作规划,实现实时响应,因此也称这样的仿真为实时仿真(real-time simulation)。

基于模型的机器人学^[3,4]的规范型,是指在计算机内建立机器人运动的环境模型,依次对机器人运动进行仿真和动作规划,并驱动机器人。在线仿真属于规范型的关键技术之一。依靠仿真可以根据环境状况制定轨迹规划,并修正规划。它的一个典型的功能就是实时避障。

长期以来,人们一直都在开展对机械手、

移动机器人的避障研究。对于机械手来说,因为它的自由度多,因此有关利用形状模型的动作仿真的研究很盛行。此时采用的避障动作大致可以分为以下两大类型:

① 基于空间描述的试探方法。在计算机内部储存并描述机器人不发生碰撞的运动空间(自由空间),并用图形试探法在该空间中确定从初始点到目标点的路径。

② 基于人工势场函数的方法。定义与障碍物距离有关的排斥力和与目标点距离相关的吸引力的人工势场,基于人工势场确定机器人的运动动作。

在第①种方法中,每次机械手进行移动都必须描述多维空间。因此,对多维空间处理和探索所花费的计算量不可低估,处理不当将导致计算量的急剧增加。可见这种方法难以应付实时处理。对第②种方法来说,如果三维环境很复杂,那么人工势场函数的定义就相当困难,只有简化环境建模才能满足实时处理的要求。Khatib^[5]利用人工势场函数对环境建模,在机械手移动时随时对函数值进行评价,防止其值超过限度,从而实现了障碍物回避。

离线仿真和在线仿真的模型是有区别的。前者的描述形式通常以三维形状、作业知识符号等为中心展开,与此相反,后者通常以动作目标值、人工势场函数值等数值信息为中心展开。随着计算机的计算速度不断提升,多自由度机器人在线仿真已经逐渐成为可能。有关这一点,将在本章5.5.3节中加以详细的讲述。

5.5.2 传感器的仿真

为了使机器人能自主运动,构建获取外界信息的传感器系统是不可缺少的。与驱动仿真器一样,为了有效利用各种传感器需要开发支持传感器应用的仿真器^[6]。有关传感器仿真的研究课题可以列举如下:

① 与传感器交互的程序离线仿真。

② 有效利用传感器的规划仿真。

③ 传感器实时处理仿真系统,以及基于它的行动控制。

1. 传感器的离线仿真

对传感器的仿真研究比机器人动作的仿

真研究开展得相对少一些。原因是依据物理规律对多个传感器进行动作仿真存在一定的困难。早期的传感器仿真研究,囿于计算机能力不足,多数限于在线处理。例如,IBM开发了机器人语言 AML 描述的传感器动作程序仿真系统 EMULA^[7]。EMULA 系统由扩展的实体模型 GDP 建模系统、AML 系统、仿真系统、图形显示系统组成。通过向机器人运动程序中插入仿真命令来实现传感器事态的仿真。

2. 视觉传感器的仿真

各种传感器中用得最多的当数视觉传感器,人们一直期待视觉传感器仿真技术的充分应用^[8]。不过,使用视觉传感器识别对象物时,如果在摄像机与物体之间有障碍物,那么物体位置的分布就是不合理的。这时需要预先通过仿真对摄像机的位置安排进行调整。

坂根等开发了支持视觉传感器离线仿真的手眼仿真系统 HEAVEN^[9]。该系统先将环境识别和监视摄像机建模,然后再处理手眼系统中的视觉系统与环境、视觉系统内部之间的相互关系问题。图 5.27 表示了这个系统的构成。支持视觉传感器的仿真器有如下功能:

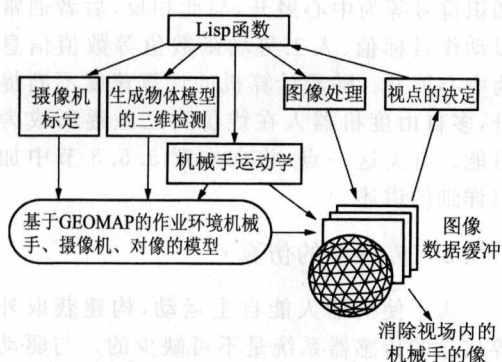


图 5.27 手眼仿真器系统 HEAVEN 的结构组成^[9]

(1) 摄像机的配置规划 必须事先避开对象和摄像机之间的障碍物,将摄像机移到对测量和摄像机来说没有障碍的位置。通过仿真求解遮挡物体的避障问题(图 5.28),可以规划出最佳的摄像机配置位置。

(2) 照明的规划 为了使摄像机获得最佳图像信息,必须设法使其具有最佳的照明位置、方向和获取最多的图像数量。

(3) 消除视场内的障碍物 通过对摄像机和机器人的仿真,将出现在机械手和其他机器人视场中的妨碍识别的图像从输入画面中删除。

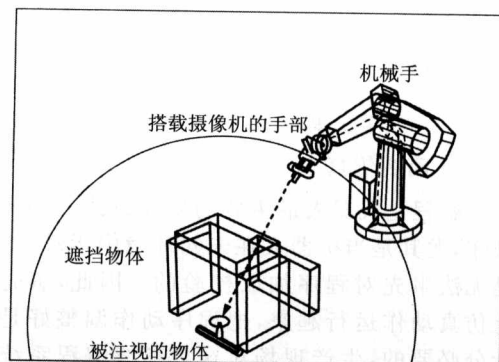


图 5.28 避开遮挡的问题^[9]

三浦等^[10]提出了基于作业任务的视觉识别策略生成方法。视觉识别策略由视觉信息确定、视觉观测特征确定、传感器配置等几个具体的视觉策略确定步骤组成。他们提出了在已知环境中基于环境模型信息的装配作业的视觉识别策略制定方法,并以将轴插入孔的装配作业为例验证了策略的有效性。

3. 视觉功能的实时仿真

人们还研究了计算机模拟传感器的功能、虚拟传感器信息生成的作业规划和实施方法。为了实现移动机器人的导航,松本等^[11]提出了由计算机图形学生成机器人模型,进一步再生成摄像机可辨认图像的方法,开发出移动机器人仿真器 VSS(View Simulation System)。目前,图像显示硬件的功能已经相当强大,实时生成供图像处理用的高逼真图像已经不成问题。它所具备的功能有高质量图像生成、实时图像生成、软件互换性、动作命令互换性等。

VSS 的概念如图 5.29 所示。它根据与实际机器人相同的虚拟环境中生成的图像信息来识别环境,如果进一步能实时生成图像,那么它就可以一边在实际环境中移动,同时实现在虚拟环境中的移动仿真。其中,VSS 构筑了基于图像序列记忆的行走方法仿真系统。

最近,中村等^[12]和 Kuffner 等^[13]为拟人机器人提出了基于计算机图形学的图像处理

仿真方法,它正在成为具有视觉的机器人的有力的开发工具。图 5.30 给出中村等提供的视场仿真实例。

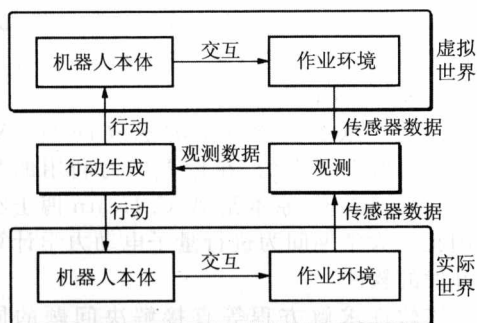


图 5.29 VSS 概念图^[11]

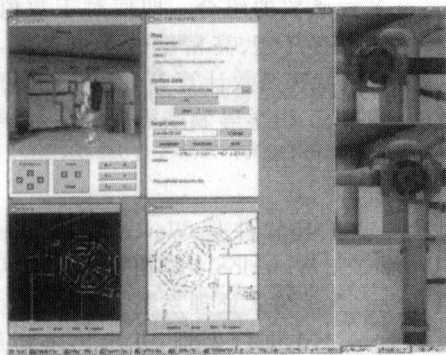


图 5.30 视场图像仿真器生成的图像和处理结果^[12]

5.5.3 软件集成开发环境

以机械手、移动机器人为对象的软件集成开发环境历来是研究人员开发的热点,它将动作仿真方法、传感器仿真方法整合到集成化的编程系统中。随着对拟人机器人研究的盛行,人们正在开发更高水平的软件集成开发系统。

1. 机械手和移动机器人的软件开发环境

开发环境是综合本章 5.5.1 节阐述的机器人动作仿真功能和 5.5.2 节阐述的传感器仿真功能的结果,它是目前机器人研究所必需的软件工具。随着对机器人编程语言研究的盛行,将仿真系统整合成一个软件集成开发环境的重要性越来越受到重视。实际上,从斯坦福(Stanford)大学开发机器人语言 AL^[14]的时代开始,对图形仿真功能的讨论就一直长盛不衰。其后,陆续有基于形状模型

的作业环境建模理论、基于模型的机器人学(由模型开展动作程序开发)问世,支持包含传感器仿真编程的仿真技术也已建立起来。松井等^[15]开发了支持上述编程的所谓多媒体显示装置,它是集文本、实时显示、图形于一身的高速显示装置。图 5.31 给出了这样的显示装置的实例。再后来,具备仿真系统的机器人编程系统也被开发出来,它显示出在机械手智能遥控操作系统的应用方面的有效性^[16]。

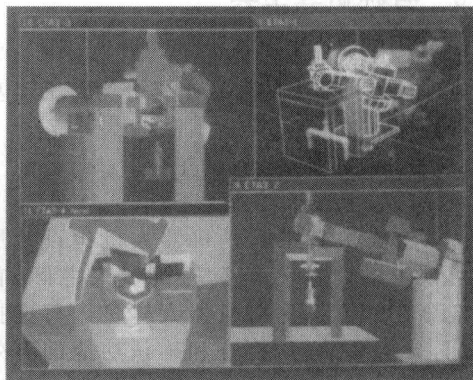


图 5.31 多媒体显示仿真^[15]

2. 多自由度机器人的软件开发环境

对拟人机器人研究的盛行使仿真系统的作用越发显得重要。拟人机器人具有远远多于机械手或移动机器人的自由度,为了实现双足步行,必须在实际演示前通过仿真器充分开展动作的校验。近年来,廉价三维图像处理卡的性能得到迅速提高,已经达到能够整合 OpenGL 等编程环境,使其极其便捷地使用三维图形学环境的程度。金广等在 PC 机上利用游戏高速动力学运算软件包,构建成开发拟人机器人系统的高速的仿真器 FAST^[17]。

稻叶等^[18]将各种遥控操作机器人作为研究平台,构建了虚拟环境下基于视觉的运动仿真系统,在它上面可以开展各类小型机器人基于几何模型的行动仿真。它还能与市场上销售的动态仿真系统 DADS 集成起来构成有效的拟人机器人编程平台^[19]。

日本经济产业部立项的“与人类协调共存的机器人系统的研究开发”大型计划,已经开发了一个面向拟人机器人的集成开发

环境 OpenHRP (Open Architecture Humanoid Robotics Platform)^[20], 它以动力学仿真器为核心, 整合了用户接口、避障规划模块、视场图像仿真等系统, 能对拟人机器人的运动控制软件和动作规划算法进行开发, 使其不必修改软件即可适应机器人的硬件。由于采用了视场图像仿真系统, 已经可以实现视觉信息处理和运动控制集成的视觉反馈控制仿真。

小笠原司

5.6 各种仿真工具

5.6.1 引言

本节将机器人的仿真工具分为两大类型进行处理:

- ① 支持机器人设计的工具。
- ② 支持机器人编程的工具。

第①类仿真工具是机器人机构设计所不可缺少的。在制作新的机器人之际, 首先应该在计算机上对机器人样机进行虚拟装配, 分析其结构, 检查和确认功能的有效性, 验证力学模型的正确性。设计人员应该依据上述结果最终完成控制方式的设计。目前, 市场上已经有支持第①类的各类软件出售, 如相关的数学公式处理、动力学/运动学等的工具软件, 也有一些免费的工具软件供用户使用。

第②类仿真工具涉及的技术领域非常广泛, 从包含机器人及其环境在内的计算机建模技术、基于这些模型的规划技术, 直至支持机器人控制系统设计和感觉系统构建的技术等。与第②类有关的控制系统、数据结构和算法、视觉信息处理、语音合成与识别、学习算法等工具软件已经在市场上有销售, 此外也有一些相关的免费软件面世。

下面我们来介绍这两种软件工具中有哪些是出售的, 哪些是免费的。我们打算主要介绍市售仿真产品的简单功能, 而在介绍免费软件时主要将它与市售软件进行比较。

5.6.2 机构设计的支持工具

1. 数学公式处理

数学公式处理的工具软件原本是在数学、化学、物理学、天文学等领域使用的, 近年来由于计算机性能的提高, 以及对工具软

件本身认知度的增强, 它们在机器人学领域中也得到广泛的应用。实际上, 机器人学计算仅仅用到这些工具软件的部分功能, 因此用户有必要事先了解这些工具软件中是否含有自己需要的功能和库函数。众所周知, 市售的数学公式处理工具软件有以下三种:

1) REDUCE^[1]

这是一款由美国 RAND 公司的 Dr. A. C. Hearn 博士开发的、在世界广为利用的数学公式处理系统, 原本是 A. C. Hearn 博士在美国犹他大学期间为进行量子电动力学计算而开发的软件。

该软件求解方程等直接解决问题的同时, 还配备了大量求解各种问题的工具。用户还可以通过自己编程来自定义新的函数, 甚至多种函数的组合。即使对于数值计算, 其内部也有高速、高精度的浮点运算, 支持初等函数、特殊函数计算等多种功能, 可以在数学、物理、工程学等领域需要开展数学公式处理的地方使用。

2) Maple^[2]

这一款工具软件是 Waterloo Maplesoft 公司在加拿大 Waterloo 大学研究成果的基础上再开发的数学公式处理系统。它能对含有变量的数学公式进行处理, 并求出解析解。因为能用数学符号清晰地表示被处理的数学公式, 所以它不仅易于把握处理作业的内容, 而且还能以公式的形式进行含有分数或无限大数值的数值计算, 完全不必担心出现数值圆整计算误差。它能通过人机接口十分方便地利用数学公式, 以及数值计算、图形化、动画、编程等功能。

3) Mathematica^[3]

这是由美国 Wolfram Research 公司为数学计算和其他领域应用开发的通用集成软件。它是一款非常有名的工具软件, 推荐它的相关书籍数不胜数。

该系统的优点除了数学公式、数值计算处理方面的灵活性外, 它还有优异的图形功能, 它能将检测仪器获得的实验数据、其他程序分析结果进行数据加工和图形显示, 因此可以用来做数据分析。它还能读入各种图像数据, 完成从滤波器设计到图像分析等各种工作。此外, 该软件还备有数百种以上的函数、特种函数和命令, 能直接按照教科书给出

的数学公式的形式输入,因此允许按照数学思考方式直接进入编程。

最近,市场上已经出现了与上述市售工具软件类似的免费软件。

4) MuPAD^[4]

MuPAD 是德国 Paderborn 大学的一个研究团队开发的工具软件。它与 Maple V 和 Mathematica 具有相似的功能,也有图形接口。尽管在命令体系上与 Maple 相似,不过遗憾的是它的处理速度比 Maple 慢一些。

2. 动力学/运动学

在描述机器人的行为举动时,动力学和运动学工具软件是必不可少的。采用本小节介绍的软件,可以对设计出的机构模型进行高效验证。众所周知的市售工具软件有以下三种:

1) ADAMS^[5]

这是美国 Mechanical Dynamics 公司开发的,具有业界规范的机构系统分析软件。用户可以借助于它在计算机上对复杂机械系统边设计边试验,对机械的动作进行可视化数值分析探讨。它被广泛地应用于汽车、电机、通用机械,以及各种产业领域从事产品动态性能的预测、设计方案的评价和验证、加速实验过程、新产品提交、事故检验等方面。此外,它还能借助于程序与 CAD、FEM、控制设定、CG 等程序有机结合,降低了样机的开发成本,缩短了开发周期。该工具软件由 Pre-Post 处理器、解答器等组成基本软件包(ADAMS/Full Simulation Package)和执行程序。

2) DADS^[6]

DADS 是由美国 LMS International 公司开发的机构分析软件,可以对多个零部件构成的多体系统的动作和力等动态行为进行预测和评估。它能高精度地针对弹性体零件模型,包括控制系统的模型、考虑摩擦和碰撞的模型进行分析,它具有性能优良的主处理器,能通过人机对话型动画界面实现动作可视化和图形显示。整个软件由多个基本模块(DADS/Standard、Basic、Advanced 等)和自选模块组成,可以根据目的和用途选择相应模块,实现更为个性化的仿真任务。

3) Working Model 2D/visualNastran Desktop^[7]

这是在 Windows 基础上运行的二维/三维动力学与运动学仿真软件包。visualNastran Desktop 在 2000 年以前的名字就是大家所熟知的 Working Model/Motion 工具软件。它可以简单地对 CAD 设计的机构复杂动作进行检查验证。一旦出现物理性能方面的矛盾,仿真器会自动停止。由于它备有与 MATLAB 的接口,故可以先用 Working Model 构建控制对象的物理模型,然后在 MATLAB 上设计相应的控制系统。

以上工具软件可以整合成动力学与运动学仿真用的集成环境。不过依据具体情况,仿真系统未必越大越好。有时下面的免费库软件也能很好完成动力学仿真。

4) DynaMechs^[8]

它原本是俄亥俄州立大学电气工程系两个学生的研究项目,任务定在开发动力学、流体力学实时仿真系统。该工具软件于 1991 年由 Scott McMillan 首先完成,后来经 Duane Marheka 在 library version 4.0 中改进成处理闭链杆件系统的仿真系统。

该软件包(交互式平台与面向对象的 C++ 类库)可以处理关节连接的各种机构的动力学仿真,其中包括简单串联连杆机构、树状结构的杆件机构、闭链连杆机构等。此外,由于使用库函数可以依据流体力学近似求解水中移动物体的驱动力,故还可以进行具有机械手的水下机器人系统的仿真。就关节而言,它可以处理标准的转动关节、移动关节和球面关节。

5) Darwin 2k^[9]

Darwin 2k 是能对各种机器人进行动力学仿真和自动设计生成的软件系统,在制作机器人时,它还能支持从工程设计到控制系统的试制。例如,具有推导机械零件内应力的功能,以及电机、齿轮减速器性能模型仿真功能等。

该软件包不仅是一种简单的动力学仿真工具,它还包含对机器人设计和编程来说用途广泛的控制系统、机器人模块,以及其

他重要模块。这个软件包甚至包含机构自动生成和最优化的进化算法。有关算法的详细信息参见文献[10]。

5.6.3 编程支持工具

1. 控制系统

众所周知的支持控制系统所设计的著名仿真工具如下:

1) MATLAB, Simulink^[11]

这款工具软件是由美国 MathWorks 公司开发的人机对话型软件。它提供了科学与工程领域数据分析、建模与仿真、可视化及编程的功能。MATLAB 的工具中包括核心模块(数值计算、数据分析、数据可视化、GUI 构建)、各种 Toolbox(控制分析、信号处理、图像处理、神经网络、Wavelet 分析及其他软件包)、Simulink(方框图表环境)、Stateflow(状态迁移图环境)、Real-Time Workshop(C 语言生成环境)等。各种工具软件整合后可以支持开展各个领域的研究与开发。由于它具有人机对话的处理灵活性,故还可以面向非定型处理的数据分析。

最近,类似 MATLAB 的免费工具软件已经在市场上出现,以下是一些著名的软件。

2) Scilab, Scicos^[12]

Scilab 是由 INRIA(法国国立计算机科学与控制研究所)开发的数值运算软件包,它包含的高级图形功能适用于各种形式的仿真、控制系统设计、信号处理(也可以输入输出 wav 文件)等。它虽然与 MATLAB 并非 100% 的兼容,但是仍然具有相当程度上的互换性。最早它就是作为 MATLAB 的克隆版编制完成的,有优良的图形处理功能,能够与 Maple 链接,无论是 Linux 还是 Windows 操作系统都适合安装。此外,在 Scilab 里有 Scicos,通过 GUI 操作能进行控制系统的构建与分析。Scicos 还能与 MATLAB 中的 Simulink 一样建模。这个 Scicos 不仅可以将微分方程式书写成所谓的方块图图解形式,即使记不住 Scilab 处理语言的使用法仍然能很简单地掌握它。

3) Octave^[13]

Octave 是以矩阵运算为中心的数值计算解释程序语言,能完成几乎所有理工科数值计算,例如,矩阵与向量运算、联立方程式、固定值、数值积分、常微分方程、非线性方程、统

计计算、快速傅里叶变换(FFT)等。它通过 gnuplot 实现图形显示。它最初开发的目的是为学习化学的学生做简单数值计算用的工具,所以它既允许安装在 Linux 操作系统中,也允许安装在 Windows 操作系统中。在不必安装目标程序这一点上,它不及 MATLAB,但是在求解线性微分方程式和计算固有值的函数的速度、可靠性方面它都不比 MATLAB 差,甚至还超过 MATLAB。

4) Rlab^[14]

Rlab 是以矩阵运算为中心的数值计算解释程序语言,具有与市售 MATLAB 同样的功能,甚至能通过更合理的命令描述予以实现。它基于 gnuplot 实现图形显示。Rlab 虽然具有与 MATLAB 一样的功能,但不是 MATLAB 的克隆版。由于它在命令表述方面与 MATLAB 的差别很大,所以在替代 MATLAB 使用时,采用 Octave 应该说更好一些。

5) MaTX^[15]

MaTX 是日本国产数值计算软件,由东京工业大学工学部系统工程系开发,可以进行控制系统的分析、设计和仿真。由于它的语言的格式与 C 语言类似,所以容易记忆。其特点是针对不同目的可以分别使用解释程序与汇编程序,以实现高效计算作业。

2. 数据结构与算法

编写高效程序是非常重要的事情,为此需要设计合理的“数据结构”和选择好的算法。所以,若能简单参照优秀的数据结构和算法,显然能够提高软件的开发效率。众所周知,有以下一些可以借鉴的优秀数据结构和算法程序库:

1) LEDA^[16]

LEDA 以德国 Maxplanc 研究所为主开发,是可以支持高效数据结构和算法的 C++ 库。LEDA 是为求解图论(最短路径问题等)、算法、几何问题等所构建,其优点有用途广、使用方便、扩展性好、成熟度高、不依靠平台就能使用等。无论是初学者还是专家用起来都得心应手。LEDA 允许通过实验观察比较不同数据结构的效率,以便从中选择高效数据结构做成库函数提供用户,因此程序员只需选择数据结构即可。LEDA 不单单是一个库,在算法的描述方面它具有很方便的

控制结构,因此可以把它看作是一种算法的表述语言。目前,LEDA 在世界上很多大学的信息处理教育和研究方面得到广泛应用,同时在遗传基因的基因组分析、汽车产业资源优化分配计划、地理信息系统的研究中也得到广泛应用。

最近,在编制实际程序方面出现许多有用的免费程序库软件。下面举例说明其中很小的一部分。

2) OpenGL^[17], Mesa^[18], GLUT^[19]

OpenGL 原本由 SGI(Silicon Graphics)图形公司开发,是不依赖 OS 的三维图形程序库(API)。为了能将其搭载在自己公司的 OS 上,微软公司(以下简称“MS”)从 SGI 公司购买了 OpenGL 的许可权,结果使 OpenGL 一下子成为了图形程序库软件的业界标准。

所谓 GLUT 就是 OpenGL Utility Toolkit 的缩写,它很类似于原本 OpenGL 与 Windows 处理关系的程序库(AUX 程序库),是一种能够编制更为复杂程序的程序库。

此外,为了在 Linux 环境中能构建图形开发环境,开发出了具有非常类似 OpenGL 的 API 三维的图形程序库 Mesa。

3) CGAL^[16]

CGAL 是有关计算几何学的 C++ 程序库,由欧洲和以色列几个研究机构合作开发而成。鉴于计算几何学的重要性,CGAL 为产业界和大学的许多用户提供了一个高可靠性的程序。CGAL 的程序库中有几何学基本元素(点、线、向量等)、几何学运算(相交判断、距离测量等)。此外还准备了标准数据结构 and 几何学算法(在二维、三维空间中的凸包计算与德洛奈三角形的构建等)程序库。

3. 视觉信息处理

个人开发图像处理算法程序是一件非常费事的工作。其实,如果有人打算尝试图像处理算法,他可以方便地利用下面的免费程序库软件来输入图像。

1) IPL, OpenCV^[20]

IPL 就是 Intel 公司的图像处理程序库。IPL 提供标准动态链接库(DLL)、静态程序库等形式的图像处理底层函数。这些函数很符合 Intel 结构的单片机,特别是能高效利用 MMX 技术实现图像的高速处理。

OpenCV 是 Intel Open Source Computer Vision Library 的简称,是 Intel 公司以开放源代码形式公开的、与计算机视觉相关的程序库。它主要使用 IPL 的库函数的形式提供实现更高层图像处理的函数。

除此以外,在 CMU 网页^[21]上还介绍了各种图像处理所需的软件。打算使用某种图像处理算法的人只要从这个 URL 介绍的网页中选择适当的软件下载到自己的计算机内存中使用即可。

4. 语音合成与识别

最近出现了不少能与人交流的机器人。语音就是机器人与人交流的方式之一。实现语音交流必须有良好的语音合成软件和语音识别软件,以及必要的软件库。以下列举几个人们熟知的一些市售的工具软件。

1) ViaVoice SDK^[22]

ViaVoice SDK 是 IBM 公司开发的适用于 PC 机使用的语音识别软件。它具有识别由话筒发出的人的语音,记录口述输入文章的功能(口授功能),以及通过语音操作 PC 机的功能(导航功能)等。

它的语音识别与合成时可识别美国英语、英国英语、法语、德语、意大利语、西班牙语、日语、汉语(简体)和汉语(繁体)等 9 种语言。

最近,一些免费使用的语音合成与识别的库软件也已经面世。有多种 SDK 软件,下面介绍人们比较熟悉的几种。

2) NEC Voice SDK^[23]

该软件由日本 NEC 公司开发,开发的关键技术可归纳为:以语音识别与合成研究成果为基础的 NEC 语音识别与合成引擎,从应用的角度利用该引擎开发出的 OLE 客户控制、功能扩展程序库,以及相关文本与样本等。它的运行平台只有 Windows。

3) Julius^[24]

Julius 是免费的高性能语音识别软件。它是大词汇连续语音识别解码器,能以数万个语汇为对象进行文章的读音识别。Julius 的高速语音识别可以在一般配置的 PC 机上实现,对 20 000 个词汇的连续读音,其识别率可以达到 90% 以上。

Julius 最大的特点是可移植性。它可以编排发音词典、语言模型、音响模型等各种语

音识别模块,广泛应用于各种领域。由于该程序的源代码(C语言)完全公开,因此很容易向其他平台进行移植和改造。它的主运行平台是 Linux、Solaris 等的 Unix,也有 Windows 版本。

5. 学习算法

构成智能系统的方法就是在系统中嵌入学习功能。自己开发学习算法非常费事。如果人们打算尝试某种学习算法,利用下面的免费程序库软件将十分简单。

1) MLC++^[25]

MLC++原来是美国斯坦福大学的 Ronny Kohavi(现在 SGI 公司)编制的机器学习程序库。机器学习算法包括:有教师的机器学习、分类算法、相关算法、决策树、ID3、决策图、贝叶斯法、归纳法,以及基于事例的算法等,该机器的学习程序库收纳了几乎所有的学习算法。

2) MSBNx^[26]

MSBNx 由微软公司研究院开发,是一种为生成和评价贝叶斯网络而编制的元素标准的 Windows 应用程序。在应用安装模块中包含帮助文件和采样网络。贝叶斯网络利用 XML 文件进行格式化编码。

3) WebSim^[27]

WebSim 是由神经元网络算法、强化学习算法、分形算法构成的仿真器。WebSim 具有优良的可扩展性,能不断追加需要的功能。WebSim 也可以使用下面列举的模块组合进行仿真和设计。

用作学习算法有教师的学习、TD 学习、Q 学习模块等。用作函数近似器有查表法、线性近似、多层感知器模块等。作为最速梯度法有后向传播法、共轭法等。作为图形表示法有 2D 图、3D 图、等高线图等模块。

5.6.4 结束语

在本节中,我们列举了从机器人结构设计到构建机器人控制系统、传感器系统所必需的工具软件,并对最通用的和有效的工具软件做了介绍,通过引用相关网页的内容,本节对这些工具软件的概要进行了解说。作者希望这些信息能对实际机器人的构建提供帮助。

中村恭之

参考文献

5.2 支持机器人设计的仿真技术

- [1] M. W. Walker and D. E. Orin: Efficient dynamic computer simulation of robot manipulators, ASME J. Dyn. Syst., Meas., Contr., Vol.104 (1982) pp.205-211
- [2] R. Featherstone: Robot Dynamics Algorithm, Kluwer (1987)
- [3] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul: On-line computational scheme for mechanical manipulators, ASME Journal on Dynamic Systems, Measurement and Control, 104 (1980) pp.69-76
- [4] J. M. Hollerbach: A recursive lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity, IEEE Trans. on Sys., Man and Cybern., Vol.10, No. 11 (1980) pp.730-736
- [5] 中村: パラレルメカニズムの動力学, 日本ロボット学会誌, 10 (6) (1992) pp.709-714
- [6] Farid M. L. Amirouche: Computational Methods in Multibody Dynamics, Prentice Hall (1992)
- [7] D. A. Smith: Reaction force analysis in generalized machine systems, Trans. ASME J. for Industry, Vol.95 (1973) pp.617-623
- [8] B. Paul: Analytical dynamics of mechanisms—A computer oriented overview, Mech. Mach. Theory, Vol.10 (1975) pp.481-507
- [9] J. Y. S. Luh and Y. Zheng: Computation of input generalized forces for robots with closed kinematic chain mechanisms, IEEE J. Robotics and Automation, Vol.1 (1985) pp.95-103
- [10] J. F. Kleinfinger and W. Rhalil: Dynamic Modeling of Closed-Loop Robots, Proceedings of the 16th International Symposium on Industrial Robots (1986) pp.401-412
- [11] 遠山, 渡部, 田野: 閉ループを持つ機構の効率的な順動力学解法—第1報: 漸化式形式の順動力学解法, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2 (1996) pp.279-286
- [12] Y. Nakamura and M. Ghodoussi: Dynamics computation of closed-link robot mechanisms with nonredundant and redundant actuators, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.5, No.3 (1989) pp.294-302
- [13] H. Hemami and B. F. Wyman: Modeling and control of constrained dynamic systems with application to biped locomotion in the frontal plane, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.24, No.4 (1979) pp.526-535
- [14] Y. Nakamura and T. Ropponen: Actuation Redundancy of a Closed Link Manipulator, Proceedings of 1990 American Control Conference (1990) pp. 2294-2299
- [15] 中村, 横小路, 花房, 吉川: ロボットマニピュレータの運動学と動力学の統合化計算, 計測自動制御学会論文集, Vol.23, No.5 (1987) pp.71-78

- [16] 杉本：閉ループ機構の運動方程式の導出，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.3 (1997) pp.460-467
- [17] Y. Nakamura and K. Yamane：Dynamics computation of structure-varying kinematic chains and its application to human figures，IEEE Transactions on Robotics and Automation，Vol.16，No.2 (2000) pp.124-134
- [18] 中村，山根，永嶋：構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.8 (1998) pp.124-131
- [19] F. Pfeiffer and C. Glocker：Multibody Dynamics with Unilateral Contacts，Wiley Series in Non-linear Science (1996)
- [20] 中村：把持とあやつり，計測と制御，Vol.29，No.3 (1990) pp.206-212
- [21] 吉田，指田，梅谷：拡張逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.3 (1993) pp.410-418
- [22] 辻尾，今口，余：マニピュレータと環境との衝突力学—衝突点における速度変化の解析と実験，第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集，Vol.3 (1999) pp.1061-1062
- [23] 藤本，河村：床との衝突および摩擦を考慮した2足歩行ロボットの三次元運動シミュレーション，日本ロボット学会誌，Vol.15，No.6 (1997) pp.47-53
- [24] O. Bruneau and F. B. Ouedzou：Dynamic Walk Simulation of Various Biped via Ankle Trajectory，Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems，Vol.1 (1998) pp.58-63
- [25] S. McMillan and D. E. Orin：Forward Dynamics of Multilegged Vehicles Using the Composite Rigid Body Method，Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998) pp.464-470
- [26] K. H. Hunt and F. R. E. Crossley：Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact，ASME Journal of Applied Mechanics，Vol.55 (1988) pp.440-445
- [27] A. Joukhadar，A. Deguet and C. Laugier：A Collision Model for Rigid and Deformable Bodies，Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998) pp.982-988
- [28] D. W. Marhefka and D. E. Orin：Simulation of Contact Using a Nonlinear Damping Model，Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1996) pp.1662-1668
- [29] 中村，山根：拘束条件が不連続に変化するリンク系の動力学—環境と接触しながら運動するヒューマンフィギュアへの応用—，日本ロボット学会誌，Vol.18，No.3 (2000) pp.435-443
- [30] K. Hirai，M. Hirose，Y. Haikawa and T. Takenaka：The Development of Honda Humanoid Robot，Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (1998) pp.1321-1326
- [31] 比留川博久：幾何アルゴリズム，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.7 (1998) pp.915-917
- [32] Y. Nakamura et al.：Humanoid robot simulator for the METIHRP Project，Robotics and Autonomous systems，Vol.37 (2001) pp.101-114
- [33] D. Baraff and A. Witkin：Large steps in cloth simulation，Proceedings of SIGGRAPH '98 (1998)
- [34] K. Yamane：Realtime Interactive Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and its Application to Motion Generation of Human Figures，Doctoral Dissertation，Dept. of Mechano-Informatics，University of Tokyo (2002)
- [35] D. S. Bae and E. J. Haug：A recursive formulation for constrained mechanical system dynamics：Part I. Open loop systems，Mechanics of Structures and Machines，Vol.15，No.3 (1987) pp.359-382
- [36] D. S. Bae and E. J. Haug：A recursive formulation for constrained mechanical system dynamics：Part II. Closed loop systems，Mechanics of Structures and Machines，Vol.15，No.4 (1987-88) pp.481-506
- [37] D. E. Rosenthal：An order n formulation for robotic systems，The Journal of the Astronautical Sciences，Vol.38，No.4 (1990) pp.511-529
- [38] David Baraff：Linear-Time Dynamics Using Lagrange Multipliers，Computer Graphics Proceedings，Annual Conference Series (1996) pp.137-146
- [39] K. Yamane and Y. Nakamura：O(n) forward dynamics computation of open kinematic chains based on the principle of virtual work，Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation，Vol.3 (2001) pp.2824-2831
- [40] A. Fijany，I. Sharf and G. M. T. D'Eleuterio：Parallel O($\log N$) algorithms for computation of manipulator forward dynamics，IEEE Transactions on Robotics and Automation，Vol.11，No.3 (1995) pp.389-400
- [41] R. Featherstone：A divide-and-conquer articulated-body algorithm for parallel O($\log(n)$) calculation of rigid-body dynamics. Part 1：Basic algorithm，International Journal of Robotics Research，Vol.18，No.9 (1999) pp.867-875
- [42] R. Featherstone：A divide-and-conquer articulated body algorithm for parallel O($\log(n)$) calculation of rigid-body dynamics. Part 2：Trees，loops，and accuracy，International Journal of Robotics Research，Vol.18，No.9 (1999) pp.876-892
- [43] K. S. Anderson and S. Duan：Highly parallelizable low order algorithm for the dynamics of complex multi-rigid-body systems，AIAA Journal on Guidance，Control and Dynamics，Vol.23，No.2 (2000) pp.355-364
- [44] K. Yamane and Y. Nakamura：Efficient parallel dynamics computation of human figures，Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation，Vol.1 (2002) pp.530-533
- [45] Mathworks 社，<http://www.mathworks.com>
- [46] Integrated Systems 社，<http://www.isi.com>
- [47] 古田勝久：制御系 CAD システムの現状と動向，電気学会誌，Vol.106，No.2 (1986)

- [48] 梶原宏之：制御系CAD，コロナ社（1988）
- [49] B. R. Markiewicz：Analysis of the Computer Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for a Computer-Controlled Manipulator, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, TM 33-601 (1973)
- [50] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul：On-line computational scheme for mechanical manipulators, ASME J. of D. S. M. C., Vol.104 (1980) pp. 69-76
- [51] J. M. Hollerbach：A recursive Lagrangian formulation of manipulator dynamics and comparative study of dynamics formulation complexity, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-10, No.11 (1980) pp.730-736
- [52] 中村仁彦，横小路泰義，花房秀郎，吉川恒夫：ロボットマニピュレータの運動学と動力学的統合化計算，計測自動制御学会論文集，Vol.23, No.5 (1987) pp.491-498
- [53] 山根克，中村仁彦，永嶋史朗：構造変化を伴うリンク系の動力学的計算法とヒューマンフィギュアの運動計算，日本ロボット学会誌，Vol.16, No.8 (1998) pp.1152-1159
- 5.3 数学公式処理と仿真**
- [1] <http://www.bekkoame.ne.jp/~ponpoko/Math/Math.html>
- [2] E. J. Kreuzer：Dynamical Analysis of Mechanisms Using Symbolical Equation Manipulation, Proc. of the 5th. World Congress on Theory of Machines and Mechanisms (1979) pp.599-602
- [3] G. Cesareo, F. Nicolo and S. Zzniosia：DYMIR：A Code for Generating Dynamic Model of Robots, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation (1984) pp.115-120
- [4] J. J. Murray and C. P. Neuman：ARM：An Algebraic Robot Dynamic Modeling Program, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation (1984) pp.103-109
- [5] J. W. Burdige：An Algorithm for Generation of Efficient Manipulator Dynamic Equation, Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation (1986) pp.212-218
- [6] 斎藤制海，梅野幸治ほか3名：REDUCEを用いたロボットアームの運動学および動力学的方程式自動生成システム，電学論C，Vol.109, No.2 (1989) pp. 89-96
- [7] P. Kovacs and G. Hommel：An Expere System for the Optimal Symbolic Solution of the Inverse Kinematics Problem, Proc. of 2nd. Int. Conf. on Automation, Robotics and Computer Vision (1992) pp.RO-4.4.1-RO-4.4.5
- [8] J. F. Nethery and M. W. Spong：Robotica：A mathematic package for robot analysis, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol.1, No. 1 (1993) pp.13-20
- [9] 川崎晴久：ROSAM：数式処理によるロボット解析システム，日本ロボット学会，Vol.14, No.3 (1996) pp.370-376
- [10] W. Khalil and D. Creusot：SYMORO+：A system for the Symbolic modelling of Robots, Robotica, Vol.15, (1997) pp.151-161
- [11] 川崎晴久，清水年美：ロボット数式処理システム ROSAM II の開発，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.3 (1999) pp.408-415
- [12] 川崎晴久，清水年美：ロボット数式処理，昭晃堂（2000）
- [13] J. Lin and F. L. Lewis：A symbolic formulation of dynamic equations for a manipulator with rigid and flexible links, Int. Jour. of Robotics Research, Vol.13, No.5 (1994) pp.454-466
- [14] B. Buchberger：Grobner Bases：An Algorithmic Method in Polynomial Ideal Theory (ed. N. K. Bose), Multidimensional Systems Theory, D. Reidel Publishing Company (1985) pp.184-232
- [15] B. Buchberger：Application of Grobner Bases in Non-Linear Computational Geometry, Lecture notes in Computer Science, Vol.296 (1988) pp.52-80
- [16] C. M. Kalker-Kalkman：An implementation of Buchbergers' algorithm with application to robotics, Mech. Mach. Theory, Vol.28, No.4 (1993) pp.523-537
- [17] T. Shimizu and H. Kawasaki：An analysis for inverse kinematics of robot manipulators using Grobner basis, Jour. of Robotics and Mechatronics, Vol.9, No.5 (1997) pp.324-331
- [18] 佐藤晋一，相場亮，荒巻重登：制約理プログラミングによるロボット構造設計支援システムの構築，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.2 (1996) pp.287-295
- [19] H. Kawasaki, A. Murata and K. Kanzaki：A Symbolic Analysis of the Minimum Dynamic Parameters for the Closed-Chain Manipulator using Computer Algebra Software, Preprints of the Fourth IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'94) (1994) pp.743-748
- [20] 川崎晴久，清水年美：ロボット動的モデルにおけるベースパラメータのグレブナー基底に基づく解析，計測自動制御学会論文集，Vol.33, No.11 (1997) pp.1059-1065
- [21] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. C. Paul：On-line computational scheme for mechanical manipulators, IEEE Int. Jour. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.1, No.102 (1980) pp.69-76
- [22] M. A. Breuer：Generation of optimal code for expressions via factorization, Communications of the ACM, Vol.12, No.6 (1969) pp.333-340
- [23] 田川清治，太田有三ほか2名：ロボットの逆動力学的計算に対する最適化システム，計測自動制御学会論文集，Vol.29, No.2 (1993) pp.220-226
- [24] 田川清治，津田政彦ほか3名：最適化コンパイラによるロボット制御プログラムの開発，日本ロボット学会誌，Vol.13, No.8 (1995) pp.1199-1205
- [25] P. Fisette, J. M. Peterkenne and J. C. Samin：ROBOTAN：A Symbolic Generation of Multibody Equations to Study Mechatronic Systems, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1998)
- [26] H. Mayeda K. Yoshida and K. Osuka：Base

- parameters of manipulator dynamic models, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.6, No. 3 (1990) pp.312-321
- [27] W. Khalil, F. Bennis and M. Gautier : The use of the generalized links to determine the minimum inertial parameters of robots, Jour. of Robotic Systems, Vol.7, No.2 (1990) pp.225-242
- [28] H. Kawasaki and K. Kanzaki : Minimum Dynamics Parameters of Robot Models, Robot Control 1991, (eds. I. Troch et al.) Pergamon Press (1991) pp.33-38 (Proc. of IFAC Robot Control (SYROCO '91))
- [29] 川崎晴久, 神崎一男: マニピュレータモデルにおける最小動力学パラメータと逆動力学計算法, 日本ロボット学会, Vol.11, No.1 (1993) pp.100-110
- [30] M. Ghodoussi and Y. Nakamura : Principle Base Parameters of Open and Closed Kinematic Chains, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1991) pp.84-89
- [31] 川崎晴久, 村田敦, 神崎一男: 数式処理による閉リンクマニピュレータの最小動力学パラメータの解析法, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.4 (1995) pp.558-564
- [32] H. Kawasaki, T. Shimizu and K. Kanzaki : Symbolic Analysis of the Base Parameters for Closed-Chain Robots Based on the Completion Procedure, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1996) pp.1781-1786
- [33] 川崎晴久, 西村国俊: マニピュレータのパラメータ同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.1 (1986) pp.76-83
- #### 5.4 模型与图形学
- [1] 日本図学会: CG ハンドブック, 森北出版 (1989)
- [2] C. M. Hoffmann : Geometric & Solid Modeling—An Introduction—, Morgan Kaufmann (1989)
- [3] M. Mantyla : An Introduction to Solid Modeling, Computer Science Press (1988)
- [4] H. Chiyokura : Solid Modeling with DESIGN-BASE—Theory and Implementation—, Addison-Wesley (1988)
- [5] H. Edelsbrunner : Geometry and Topology for Mesh Generation, Cambridge University Press (2001.9.25)
- [6] J. D. Foley and A. Van Dam : Fundamentals of Interactive Computer Graphics, Addison-Wesley (1982) (今宮訳: コンピュータ・グラフィックス, 日本コンピュータ協会 (1984))
- [7] J.-C. Latombe : Robot Motion Planning, Kluwer Academic (1991)
- [8] 日本図学会: シンセティック CAD—コンピュータ支援による設計製図の実例—, 培風館 (1997)
- [9] 鳥谷, 千代倉: 3次元CADの基礎と応用, 共立出版 (1991)
- [10] ISO 10303-1, Industrial automation systems and integration—Product data representation and exchange—Part 1 : Overview and fundamental principles, ISO (1994)
- [11] Jack, UGS, <http://www.ugs.com/products/efactory/jack/>.
- #### 5.5 编程仿真技术
- [1] 岡野, 吉田: オフラインプログラミングにおけるシミュレーション, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No. 2 (1988) pp.136-141
- [2] 新井, 井床, 野吾: 産業用ロボット簡易教示システム, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 (1999) pp.186-189
- [3] 白井, 井上: 知能ロボット研究の展望—モデルベース・ロボティクス—, 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No.6 (1987) pp.462-468
- [4] 長谷川: モデルとロボット行動, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.8 (1993) pp.1143-1148
- [5] O. Khatib : Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.1 (1986) pp.90-98
- [6] R. W. Daniel and P. G. Davey : Two Key Problems in Robotics Research (eds. H. Hanafusa and H. Inoue), The Robotics Research, The Second International Symposium (1985) pp.495-499
- [7] J. Mayor : An emulation system for programmable sensory robot, IBM Journal of Research and Development, Vol.25, No.6 (1981) pp.955-961
- [8] 坂根: ハンドアイシステムのシミュレーション, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.2 (1988) pp.142-146
- [9] 坂根, 石井, 柿倉: ハンドアイ行動シミュレータ: HEAVEN システムに基づく視覚センサのオクルージョン回避, 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.4 (1986) pp.382-391
- [10] 三浦, 池内: 作業の目的を考慮した視覚認識戦略の生成, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.574-585
- [11] 松本, 宮崎, 稲葉, 井上: 仮想環境を用いた視覚移動ロボットのシミュレーションの提案と画像の記憶に基づく走行手法への適用, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.5 (2002) pp.497-505
- [12] 中村ほか: 仮想ロボットプラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.28-36
- [13] J. Kuffner, S. Kagami, M. Inaba and H. Inoue : Graphical Simulation and High-Level Control of Humanoid Robots, Proc. of IROS 2000 (2000)
- [14] M. Mujtaba and R. Goldman : AL User's Manual, Stanford AI Lab. (1979)
- [15] 松井, 塚本: マルチメディアディスプレイを用いた統合型遠隔ロボット制御法, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.4 (1988) pp.301-310
- [16] T. Hasegawa, T. Suehiro, T. Ogasawara, T. Matsui, K. Kitagaki and K. Takase : An Integrated Tele-Robotics System with a Geometric Environment Model and Manipulation Skills, IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'90) (1990) pp.335-341
- [17] 金広, 稲葉, 井上: ゲーム用高速動力学演算パッケージを用いたロボットボディの仮想化, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 2P2-H 3, (2001)
- [18] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Hoshino and H. Inoue : A platform for robotics research based on the remote-brained robot approach, The International Journal of Robotics Research, Vol.19, No. 10 (2000) pp.933-954

- [19] F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue: Developmental Software Environment that is applicable to Small-size Humanoids and Life-size Humanoids, Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2001) pp.4084-4089
 - [20] F. Kanehiro, K. Fujiwara, S. Kajita, K. Yokoi, K. Kaneko and H. Hirukawa: Open Architecture Humanoid Robot Platform, Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (2002) pp.24-30
- 5.6 各种仿真工具**
- [1] REDUCE, <http://www.uni-koeln.de/REDUCE/>
 - [2] Maple, <http://www.cybernet.co.jp/maple/>
 - [3] Mathematica, <http://www.wolfram.com/>
 - [4] MuPAD, <http://www.mupad.de/>
 - [5] ADAMS, <http://www.adams.com/>
 - [6] DADS, <http://www.lms.be/>
 - [7] Working Model, <http://www.mscsoftware.co.jp/>
 - [8] DynaMechs, <http://dynamechs.sourceforge.net/>
 - [9] Darwin 2 k, <http://darwin2k.sourceforge.net/>
 - [10] Chris Leger: Darwin2K An Evolutionary Approach to Automated Design for Robotics, Kluwer Academic Publishers (2000)
 - [11] MATLAB, <http://www.cybernet.co.jp/matlab/>
 - [12] Scilab, <http://www-roq.inria.fr/scilab/>
 - [13] Octave, <http://www.octave.org/>
 - [14] Rlab, <http://rlab.sourceforge.net/>
 - [15] MaTX, <http://www.matx.org/>
 - [16] CGAL, <http://www.cgal.org/index2.html/>
 - [17] OpenGL, <http://www.sgi.com/software/opengl/>
 - [18] Mesa, <http://www.mesa3d.org/>
 - [19] GLUT, <http://www.opengl.org/developers/documentation/glut.html/>
 - [20] OpenCV, <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>
 - [21] Computer Vision Software, <http://www-cgi.cs.cmu.edu/afs/cs/project/cil/ftp/html/v-source.html/>
 - [22] ViaVoice, <http://www-6.ibm.com/jp/voiceland/index.html/>
 - [23] SmartVoice, <http://121ware.com/apinfo/voice/developer/>
 - [24] Julius, <http://winnie.kuis.kyoto-u.ac.jp/pub/julius/index.html/>
 - [25] MLC++, <http://www.sgi.com/Technology/mlc/>
 - [26] MSBNx, <http://www.research.microsoft.com/adapt/MSBNx/>
 - [27] WebSim, <http://www.Leemon.com/websim/index.html>

第 6 章 操纵型机器人

6.1 操纵型机器人系统的特征

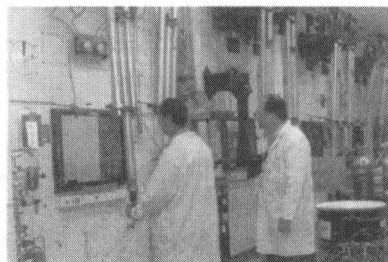
6.1.1 什么是操纵型机器人

操纵型机器人是通过人的操作完成作业的手动机器人。按照通常的定义,机器人是指能自动再现由程序给定的动作,并以传感器信号为基础自主完成动作的自动机械。严格地说来,操纵型机器人或许不应该称为机器人,但本章姑且把它也当作一种机器人来处理。

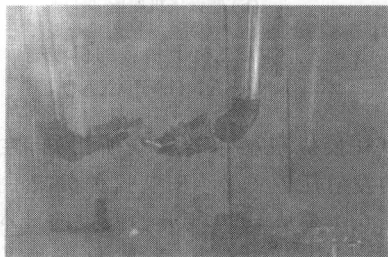
机器人的最终目的是代替人从事各种各样的作业,但是如果作业任务十分复杂,需要很强的识别力、判断力和实际作业的能力,这些事情交给计算机控制的全自主机器人执行实际上有一点勉为其难。操纵型机器人就是让人自身向机器人下达这些高级识别、判断和作业的命令。由于这个缘故,操纵型机器人多数是以空间、深海、原子反应堆等为应用背景,对人来说这些应用环境不但危险且具有作业的不确定性。

操纵型机器人的发展历史可以追溯到 20 世纪 40 年代。当时的主流是用远距离操纵的机械手来代替人工操作。操纵型机器人的分类将在本章的 6.2 节中进行详细说明,在这里我们只是介绍几个操纵型机器人实际应用的例子。图 6.1 是在与核工业相关的设施内使用的机械式机械手,它在工作空间(放射性物质操作间)中处理放射性物质。如后面所述,这种机械手的基本设计是在 20 世纪 50 年代完成的。

在生命科学领域往往需要在显微镜的视野下频繁进行大量细微的工作,图 6.2 给出在这种应用场合下使用的微操作机械手系统。它用操纵杆操纵机械手运动,位置分辨率达到 $0.1\mu\text{m}$ 左右。最近,还开发出在扫描电子显微镜和原子力显微镜环境下进行操作的微操作系统。



(a) 主侧



(b) 从侧

图 6.1 放射性物质操作间中的机械手
(位于 Los Alamos National Laboratory 的
Off-Site Source Recovery Project)

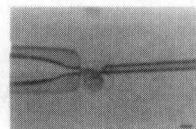
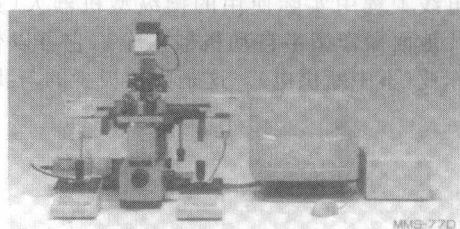
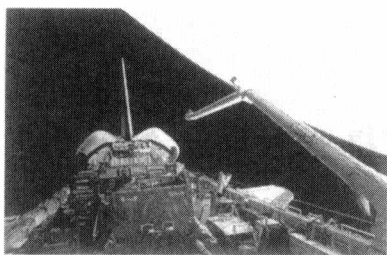
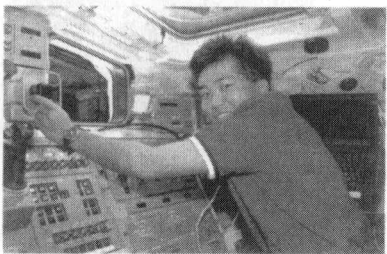


图 6.2 微机械手(岛津制作所)

1981 年首次发射的美国 NASA 航天飞机上装载的机器人手臂也是操纵型机器人,如图 6.3 所示,航天飞机座舱内的宇航员正在用两



(a) 手臂外观



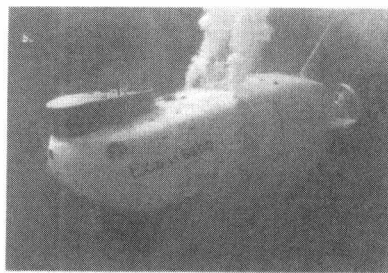
(b) 航天飞机座舱

图 6.3 航天飞机上搭载的机械臂
((a) NASA, (b) JAXA)

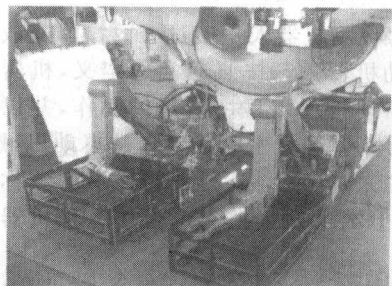
个操纵杆操纵机械手臂。众所周知,在航天飞机的发射任务中必须安装这种机械手臂。

图 6.4 是从 1990 年开始服役的日本海洋科学技术的载人潜水调查船“深海 6500”。船上装备了机械手,它既可以采集海底岩石,又可以放置观测器,它同样属于操纵型机械臂,操纵者可以在客舱内执行操作。

图 6.5 是日本九州电力公司已经在高压输电线工程中实际使用的操纵型机器人(第二代地面操作型半自动机器人车),它可以带电作业(不中断供电)。这是为数极少的与我



(a) “深海6500”载人潜水调查船

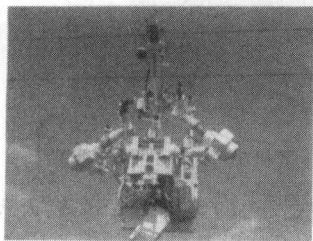


(b) 机械手的外观

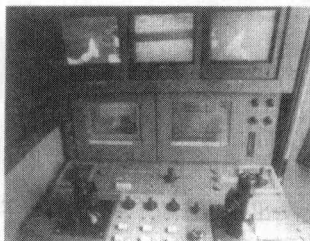
图 6.4 “深海 6500”的机械手(海洋科学技术中心)

们日常生活有关的操纵型机器人的例子。

美国 Intuitive Surgical 公司 1997 年开发的“达·芬奇”机器人(图 6.6)是一种内窥镜手术操纵型机器人。到 2002 年为止,日本已经购买了数台这样的手术机器人,而它在世界上也已经十分普及,欧美有 100 台左右。迄今为止,包括心脏冠状动脉搭桥这样高难度手术在内,全世界取得超过 7000 例的手术成果。类似的手术机器人还有美国 Computer Motion 公司的“宙斯”机器人。



(a) 双臂机器人



(b) 操作装置



(c) 作业现场

图 6.5 带电作业机器人(九州电力)



图 6.6 内窥镜手术操纵型机器人“达·芬奇”
(Intuitive Surgical Inc.)

6.1.2 操纵型机器人的操纵方式

有各种实现遥控的方法。它们大致可以分成三种类型(图 6.7):①各轴切换方式;②操纵杆方式;③主从方式。

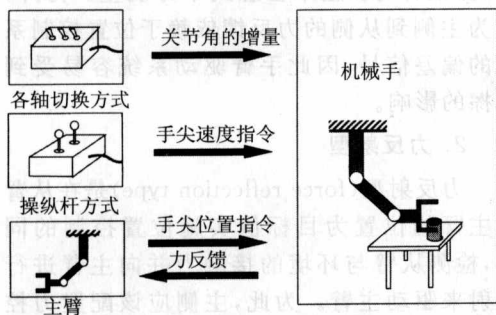


图 6.7 操纵方式的分类

1. 各轴切换方式

机器人手臂关节之间的杆件一般是串联的,最简单的操纵方法是控制各个关节的增量,即各轴切换方式。不过,机器人手臂作业时的参照系通常选择手部位置,而通过各轴切换控制方式控制手部按照期望轨迹运动是相当困难的。如果把挖掘机等建筑机械视为操纵型机器人,它们的操纵法相当于进行各轴切换,众所周知,这需要相当熟练的操作。

2. 操纵杆方式

在操纵杆方式中,因为能够直接下达手部位置和姿态的增量命令,因此比较直观。不过命令仍然是以动作增量的形式给出的,难以完成特别细微的操作。另外,操纵杆一般只有3个自由度,为了能满足三维空间的位置和姿态6个自由度的控制要求,需要双手操纵两个操纵杆,要求有熟练的技巧。操纵杆与下面要叙述的主从方式相比也有优点,就是占用的操纵空间很小,因此

进行太空作业、深海探索的机械手常常选用这种方式。

工业机器人通常使用的示教盒上既有控制各轴增量的按钮,又有控制手部位置和姿态增量的按钮,使用这些按钮进行示教与各轴切换或操纵杆的遥控方式基本相同。

3. 主从方式

主从方式(master-slave)是指采用与实际作业机器人手臂相同的多连杆机构充当操纵装置,由于操纵该装置的操纵者的手部位置与机器人手臂的手部位置相对应,故操纵者能够以接近直接作业的形态操纵机器人。在主从方式中,机器人手臂跟踪操纵装置的动作,操纵装置被称为主侧(master),机器人手臂被称为从侧(slave)。该方式也适用于除机器人手臂以外需要遥控手部或摄像头的场合。

主从方式的优点是直观感觉好。与上两种方式相比,操作主臂更接近直接作业形态。在后面会讲到,除了将操纵者的命令传给远处的从臂外,后者所承受的环境力也能够反馈给操纵者,即实现所谓的双向控制,这样就使操纵者的感觉更加接近直接操作。实际上操纵杆中也有力反馈操纵方式,不过从理论上说主从方式是最接近直接作业感觉(理想的响应^[1]或结构透明度(transparency)^[2])的方式。

主从方式的缺点是在操纵者一侧必须安装主臂,它比其他两种方式规格大,占据空间也大。如果主臂有6个自由度,那么操纵者靠单臂就足以同时控制从臂6个自由度的运动了,显得比操纵杆方便。不过这个优点有时反而会变成缺点,如在特定方向上只进行微调的场合它使用起来就不太方便了。

6.1.3 双向控制与单向控制

双向控制(bilateral control)是主从方式遥控系统的控制方法之一。之所以称其为双向控制,是因为主臂、从臂两套控制系统双方结合起来实现同样的目标值。图 6.8 给出一种典型的双向控制方式。一般说来,双向控制系统首先是主从双方都分别配置各自的控制系统,其次各控制系统的目标值都是从对方手臂读入传感器信息决定的。图 6.8 给出了几种双向控制系统的组成方式。

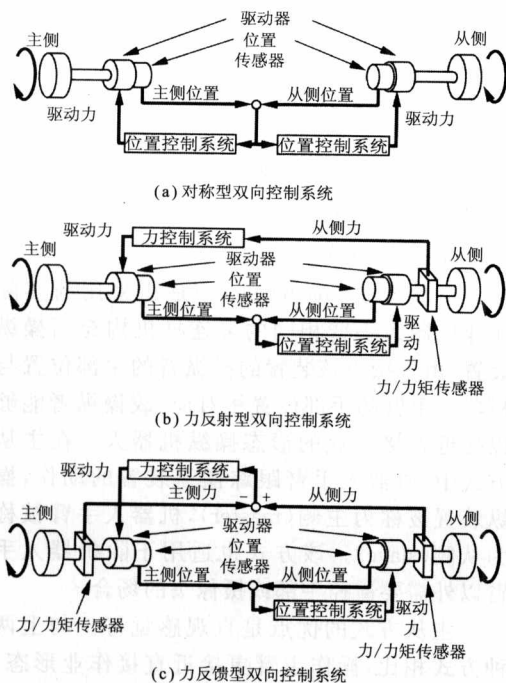


图 6.8 典型的双向控制方法

图 6.9 中的系统组成与双向控制不同,主侧没有控制系统,仅将来自主臂的目标值传给从侧控制系统,这种控制方式被称为单向控制(unilateral control)。双向控制的特征在于它不仅将操纵者的动作命令发送到从侧,而且还能以力感觉的形式将从侧的作业状况回传给操纵者。譬如,在单向控制方式中,即使从臂与环境发生某种接触,也不可能通过力感觉将这种状态传至操纵者。相反,换成双向控制就有可能,这样就能大大提高像回转曲柄一类受到环境约束的作业的效率。双向控制的缺点是主臂需要配置一套同样的驱动装置和控制系统,整个装置的体积比较大。反之,单向控制只需主臂安装位置传感器就足够了,手臂结构既轻巧又简单,如果作业比较简单又不与环境发生接触,单向控制应该完全能够胜任。

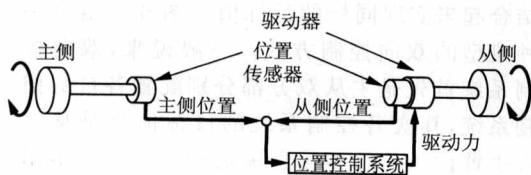


图 6.9 单向控制方法

下面我们比较详细地说明图 6.8 中给出的各种双向控制。

1. 对称型

如图 6.8(a)所示,在对称型(symmetric type)双向控制系统中,主、从双方都配置了位置控制系统,它们以对方手臂的位置为目标值构成闭环系统。因为主、从两侧对称配置了同样的位置控制系统,故将其称为对称型双向控制系统。对称型双向控制系统不需要安装力传感器(这对下述的力反射或力反馈型双向控制系统是必需的)。可见从稳定性来看,对称型是一种特性很好的控制方法。不过它也有缺点,一个是问题出在控制系统的组成上,由于主臂、从臂惯性的双重负荷作用,操纵者驾驭起来会感到十分沉重。另外,因为主侧到从侧的力反馈依赖于位置控制系统的偏差信号,因此手臂驱动系统容易受到摩擦的影响。

2. 力反射型

力反射型(force reflection type)是在从臂以主臂的位置为目标值实施位置控制的同时,检测从臂与环境的接触力并向主臂进行反射来驱动主臂。为此,主侧应该配置力控制系统,从侧则需要安装传感器来检测与环境的接触力。同样的方式还有力反馈型,不过它与力反射型的根本差异在于主侧的力控制系统是开环系统。正是由于这个缘故,在力反射型中主侧无需安装力传感器,但是如果主臂驱动系统的摩擦力很大,那么从侧的力就无法正确地回传给操纵者。

3. 力反馈型

力反馈型(force feedback type)是在从臂以主臂的位置为目标值实施位置控制的同时检测从臂与环境的接触力,主臂以此为目标值实施力控制。它与力反射型的差异在于其主臂上配有力传感器,构成一个将力的目标值误差反馈的闭环系统。由于追加了这个力反馈环,提高了系统的力灵敏度和逆驱动特性(backdrivability),因此手臂的惯性变小,其操作感提高。

上面解释了三个典型的双向控制方法。它们在 20 世纪 50 年代被提出,基本构成部分在此后的应用中并没有发生多大的变化。直到 20 世纪 80 年代的后半期,人们才开始提出

一些新的方法。主要的改进有两条：一条是提高操作性；另一条是处理通信时间的延迟。有关双向控制的最新研究动向参见文献[3,4]。

6.1.4 机器人学和虚拟现实与遥控的关系

主从方式的遥控机器人系统是现存操纵型机器人的典型形式，在本书中我们称之为主从系统。图 6.10(a)表示了双向控制主从系统的概念图。正如 6.2 节所述，操纵型机器人的发展历史很长，而工业机器人的开发和真正的机器人学的研究是在早期遥控机械手问世之后的事情。操纵型机器人既是后期机器人学研究的工具，也是 20 世纪 90 年代以来十分盛行的虚拟现实技术的工具，在本小节中对此做一些介绍。

机器人学主要的目标是以自主机器人取代人进行作业。如图 6.10(b)所示，把主从系统的操纵者或主臂替换成计算机后就可以视其为自主机器人。众所周知，最初投入研究的智能手臂，即由 MIT 的 Ernst 开发的 MH-1 主从机械手^[5]（图 6.11），其从臂就是被当作机器人使用的。不过 MH-1 中的机械手并非伺服型的（在 6.2.2 节中进行说明）而是机械式的（在 6.2.1 节进行说明），靠位于主侧的计算机控制电机驱动从侧手臂进行动作。1970 年，日本的井上等展示了根据施加机械手反力的感觉，自主调节微小力的作业实验，这是世界上最早的研究成果^[6]，机械手如图 6.12 所示，从侧的结构属于伺服型机械手。

进入 20 世纪 90 年代之后，虚拟现实（VR）引起大家的兴趣，代表性的有利用力觉或触觉反馈与虚拟环境进行交互的触觉装置（haptic device）。2003 年最有名的触觉装置商品是美国 SensAble Technologies 公司的 PHANTOM（图 6.13）。触觉的接口将来自虚拟环境的反力传给用户，实际上，它也可以被视为双向控制主臂反馈实际环境反力的接口。即触觉接口（haptic interface）是把作业环境和从臂替换成计算机仿真的接口，如图 6.10(c)所示。实际上，触觉仿真最早起源于美国北卡罗来纳大学的分子化合仿真器开发项目 GROPE^[7]（图 6.14），它的伺服型机械手，即主侧的机构就充当了触觉装置。

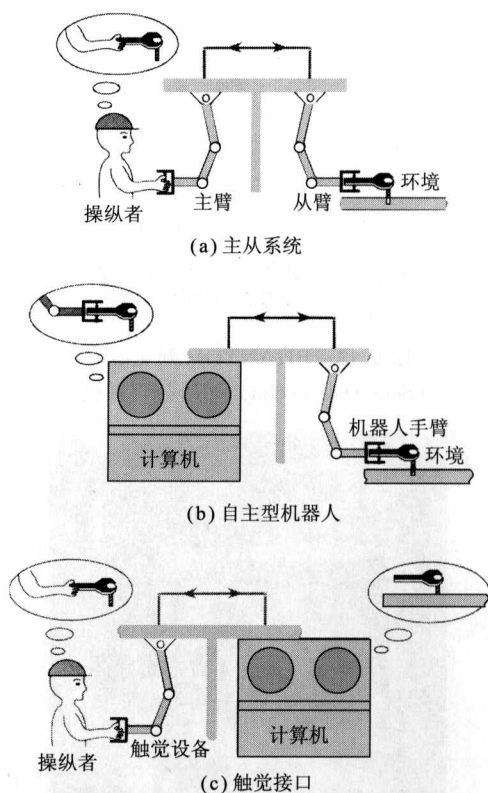


图 6.10 遥控与机器人学、虚拟现实

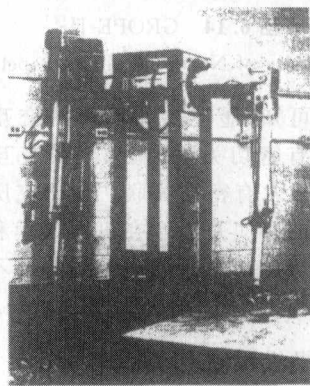


图 6.11 MH-1^[5] (MIT)

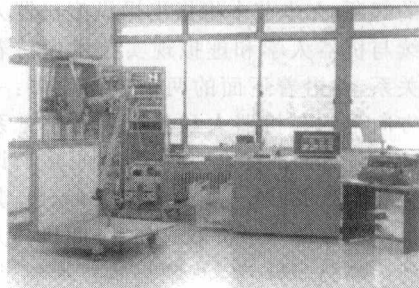


图 6.12 计算机控制的伺服型机械手(东京大学)

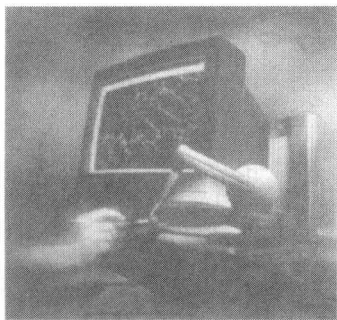


图 6.13 PHANTOM 触觉装置
(SensAble Technologies 公司提供)

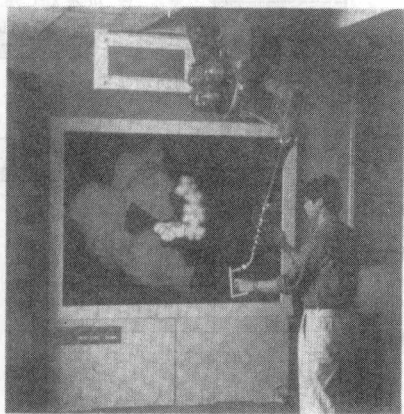


图 6.14 GROPE-III^[7]
(University of North Carolina Chapel Hill)

由此可知,遥控在和环境的交互方面与机器人学有密切关联,在和人的交互方面与虚拟现实技术有密切关联。在研究历史上一个很有趣的事实是至今在机器人学和虚拟现实各自领域的前沿研究中都始终离不开主从机械手机构。

6.1.5 操纵型机器人发展方向

6.1.4 节将遥控视为机器人学和虚拟现实技术的起源,在本节中将指出操纵型机器人目前继续与机器人学和虚拟现实技术保持着密切的关系,并沿着下面的两个方向发展:一个发展方向是它与机器人和操纵者在感觉系统和运动系统方面的结合更加紧密,形成所谓的临场感技术(teleexistence 或 telepresence),其终极目标是操纵者代替机器人作业,即机器人成了人的一部分。为了实现临场感技术,必须向操纵者,即人的一侧更加逼真地再现机器人一侧的临场感环境信息。从这个意义上来说,临

场感技术与虚拟现实有着非常密切的关联。为了实现临场感,从侧一方的机器人不能光有手臂,还应该具有手部、视觉以及其他传感器。有关这种操纵型机器人的发展将在 6.2.4 节中稍稍涉及,至于临场感技术或远程临场感觉系统则将在 6.4 节中详细地加以叙述。另一个发展方向是被操纵的机器人的智能化。如果机器人具有某种程度的智能,有些简单动作就可以交给机器人去自主处理,操纵者不必再对机器人动作发出详尽的命令,只需在高层级下达指示即可。机器人智能化的最终目的是使机器人成为人类的仆人或能干的秘书。基于这样的想法,Farewell 和 Sheridan 很早就提出监管(supervision control)的概念^[8]。20 世纪 80 年代,有人将遥控和机器人学进行融合,进一步提出了所谓的遥控机器人学的概念^[9]。其实,机器人智能化的方向原本也是机器人学的方向。但是在有人介入的遥控机器人学中,还包括全自主型机器人所未能涵盖的特殊技术问题。如果包括操纵型机器人在内的远程作业系统汲取机器人学的研究成果并将其演变成高智能系统,我们就称之为智能远程作业系统。6.2.4 节中对有关操纵型机器人在智能化方面的进展略有涉及,而有关智能远程作业系统的情况将在 6.5 节中进行详细的阐述。

6.2 操纵型机器人的分类

6.2.1 机械式主从机械手

1949 年,美国阿尔贡研究所的 Ray Goertz 开发的 Model 1 是世界上第一台主从机械手。它的主侧和从侧通过钢丝绳和钢带实现机械结合,称其为机械式主从机械手(mechanical master-slave manipulator)。图 6.15

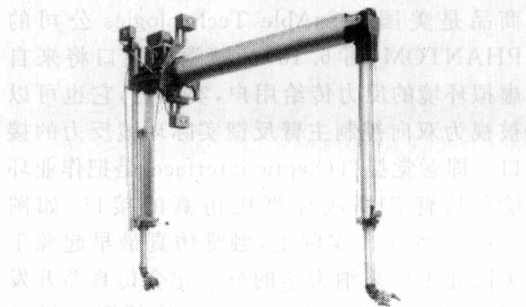


图 6.15 机械式主从机械手 Model M8
(由 Central Research Laboratories 公司提供)

是 Model M8 机械式主从机械手,它保留了 Model 1 在搬运质量、设置方便方面的优点,但又经过了改进完善。现在美国的 Central Research Laboratories^[10] 负责生产和销售 Model M8。

机械式主从机械手的特点是简单,它与伺服型主从机械手(后边将提及)的区别在于它没有电路,主侧和从侧以机械方式结合,所以通过主臂可以直接感受到来自从侧的力。但是,也正因为它是机械结合,使主、从两侧在距离上不能相隔太远,通常把它固定在低放射剂量的操作间的墙壁上,隔墙实施室内作业。

6.2.2 伺服型机械手

机械式主从机械手有诸多问题,如主从双方机械结合的形式使作业范围受限的问题、安装问题(在墙壁上必须开孔)、处理高剂量放射性物质时无法完全遮挡放射线的问题等。

美国阿尔贡研究所的 Goertz 等很早就意识到这些问题的存在,一直在致力于电气连接两侧传动的研发。为了使从侧能实现来自主侧的命令,应该在从侧配置驱动器构成伺服系统,这种主从双方以电气进行连接的机械手,被称为伺服型机械手(servo-manipulator),也叫做电动式主从机械手(electric master-slave manipulator)。不过除电机外,液压驱动也能构成伺服系统,因此伺服型机械手的称呼更一般化。1954 年,伺服型机械手的 1 号机 Model E1^[11] 问世。图 6.16 给出 Model E3 的概念图,它是 Model E1 的改进型。

电动式伺服机械手与机械式机械手不同,在位置上从臂相对于主臂分离,能进行自由移动,因此其作业范围大大扩展。不过如果是机械式,从结构设计上就能够通过动作传递机构让主侧直接感知从侧的力,反观电动式,为了做到这一点,它必须把从侧的力反馈给主臂,因此需要采用双向控制。Goertz 等很早就认识到遥控中力反馈的重要性,在 1952 年就指出了双向控制的必要性^[12],并提出了解决方案,即现在大家熟知的力反馈型双向控制法(参见 6.1.3 节)^[13]。

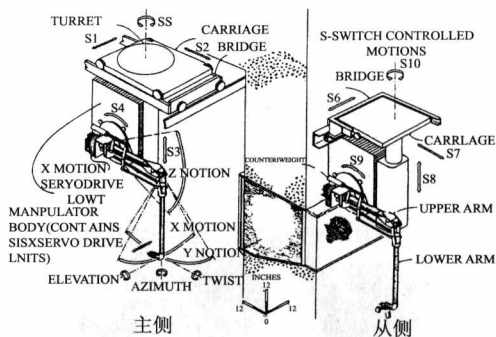


图 6.16 电动式伺服机械手 Model E3^[14]

受此影响,从 Model M8 以后,主从机械手的开发主流开始转向电动式^[14]。然而,虽然电动式确实能够克服机械式的缺点,但是它的操作性反而变差了。Goertz 等在将机械式 Model M8 与电动式 Model E3 做了一番比较后指出,如果是属于小于数千克力的轻型作业,那么 Model M8 更容易操作^[15]。其主要原因是配备驱动器后电动式 Model E3 的摩擦和惯性都大幅度增加。直至今日,机械式机械手仍然在第一线服役,除了有成本因素外,也是机械式机械手可操作性较好的一个佐证。

6.2.3 计算机嵌入型(异构主从系统)

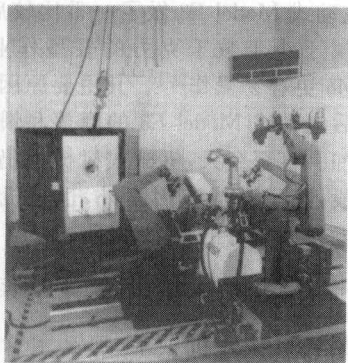
如果是机械式机械手,那么主臂和从臂的结构必须一样,因为彼此对应的各个关节都是以机械方式结合的,否则操纵者控制主臂手部的指令运动就无法在从侧方再现。早期的伺服型机械手同样因为各个关节的伺服系统都是彼此相应的,所以一般来说,主从双方也具有相同的构造,即使双方的大小不同,至少它们也属于相似型。

众所周知,机器人工程学用正运动学和逆运动学描述手臂关节变位与手部位置的关系,不过双向控制的作业变量并非关节变位而是手部的位置和姿态,故允许使用不同构造的手臂组合成主从系统,这样的系统被称为异构主从机械手。相应地,如果主臂和从臂的构造相同,则称之为同构主从机械手。异构概念最初由美国喷气推进研究所(JPL)的 Bejczy 等提出^[16]。图 6.17 给出异构主从

机械手的例子——JPL 系统,它反映了当时的技术发展趋势。



(a) 主侧



(b) 从侧

图 6.17 异构主从机械手的例子(美国 NASA/JPL/Caltech, Pasadena, California, USA 提供)

异构方式只需准备一个主臂就能操纵各种不同构造的从臂。换言之,异构方式的优点在于操纵装置具有通用性。当然,它也有缺点,即因为结构不同,当从臂的作业范围受限或需要进行避障时,操纵者难以形成从臂姿态的具体印象,另一个缺点是因手臂的奇异点不固定,故给操纵带来不便。

6.2.4 机器人技术融合型(遥控机器人学)

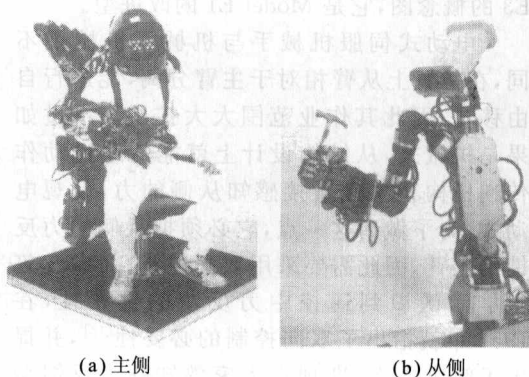
进入 20 世纪 80 年代后,运动学计算以及更多的机器人学成果被应用到操纵型机器人中。例如,机器人手部和移动机构等机构学方面的成果、触觉传感器和视觉等感知方面的成果、自动控制和人工智能等系统方面的

成果等。融合这些机器人学成果,操纵型机器人从原来的简单机械手逐渐发展得更加丰富多彩。

1. 机构与感知功能的发展

先从机械学的角度来看操纵型机器人的发展。早期操纵型机器人不过仅仅达到 6 个自由度,其末端执行器(end effector)只是简单开闭的夹持器而已。后来演进的结果是它的末端执行器被开发成与人类似的多指手,腿部配备轮式移动机构,头部配备能向操纵者提供立体视觉图像的立体摄像机。操纵这样的机器人,主侧的装置需要同时具备很强的功能。

这类机器人的先驱之一是 1989 年日本机械技术研究所(现改名为产业技术综合研究所)完成的拟人机器人“特丽莎”(图 6.34(a))。它被用于临场感的实验验证。它有双目立体视觉摄像机、话筒、扬声器、头部的 3 自由度摄像头、7 自由度手臂、开闭式手部,躯体能够进行平移,并能实现腰部的自由转动。操纵者操纵它犹如操纵自己的替身一样。图 6.18 给出美国 Space and Naval Warfare Systems Center 在 1991 年开发出的 TOPS^[17],它是继该中心 1983 年开发“绿色男人”临场感机器人后的又一个成果。该机器人在 3 自由度躯体上安装了 9 自由度双向控制多指手和 7 自由度手臂,又在 3 自由度摄像头上加装了立体摄像机。操纵者穿着外骨骼(exoskeleton)型主侧装置和头盔显示器,具有临场感。



(a) 主侧

(b) 从侧

图 6.18 TOPS(The Teleoperator/Telepresence System)(Space and Naval Warfare System Center)

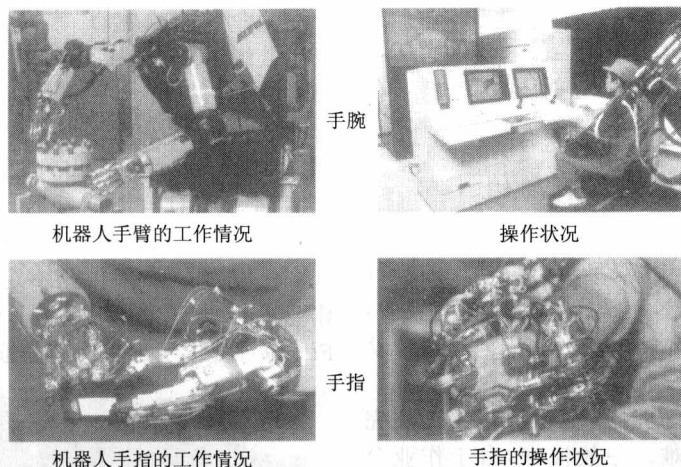


图 6.19 极限作业机器人计划中开发的核工业机器人
(摘自极限作业机器人技术研究组编的《极限作业机器人的研究开发》)

图 6.19 是 1983—1990 年日本极限作业机器人计划开发的机器人之一,它是一台设想用于核电站维修作业的操纵型机器人。它的 4 腿移动机构上搭载有双手臂、4 指机械手和双目立体视觉摄像头,手臂和手指的动作靠双向主从方式进行操纵。从侧的手部带有触觉传感器,操纵者的手部也有相应的触觉再现装置。可以说它是集当时日本机器人产业技术成果之大成。

从 1998 年起,日本经济产业省新能源产业技术综合开发机构(NEDO)启动了“与人协调·共存型机器人系统研究开发计划”(HRP: Humanoid Robotics Project)的 5 年计划。这个项目中的拟人双足步行机器人在世界上首次成功地实现了对叉车等作业机械的遥控操纵(图 6.20)。

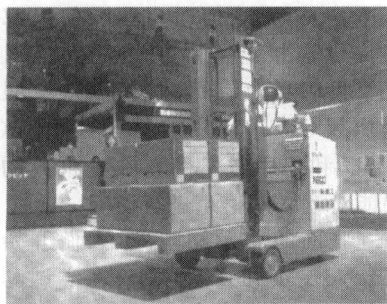


图 6.20 拟人机器人操纵的叉车
(日本产业技术综合研究所)

2. 自主的控制授予与分担

下面从自主控制技术的角度来看操纵型机器人的发展。如图 6.21 所示,自主控制与遥控有多种组合形式。交替控制(traded control)来自传统监管控制^[8]的思想,由机器人与操纵者(人)交替掌握控制的主导权。此外,还有分担控制(shared control),即机器人与人的命令值合成的情况。分担控制的典型性例子有日本电气综合研究所研究小组提议的软件夹具^[18]。其意思是在运送盛满水的玻璃杯作业中(图 6.22),往往授予从机器人自主保持玻璃杯水平姿态的控制功能。这样一来,操纵者只要下达玻璃杯的位置命令就行了,与那种需要遥控所有自由度的作业相比,其工作负担得到大幅度减轻。在前面

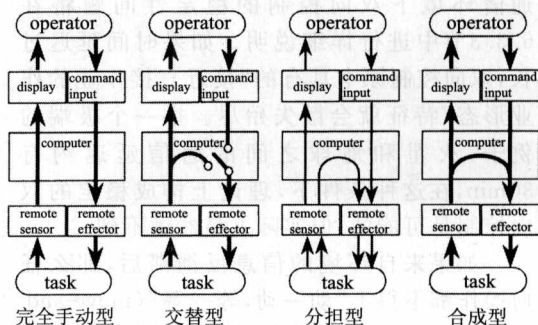


图 6.21 Shared Autonomy 的分类

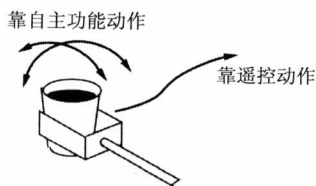


图 6.22 软件夹具

介绍的 HRP 项目中,双足步行机器人的步行动作就不是靠遥控,而是靠自主控制实现的,操纵者只需用语音发出步数和方向等命令就行了。

不过,在分担控制方面有时存在无法完全自主控制的困难。一般说来,由于作业分担的程度和内容是随进行的作业内容和进展情形动态变化的,因此出现了如何变更分担内容,如何下达分担命令的问题。最理想的情况是机器人能对操纵者的意图心领神会,能适当地分析作业者的意图,但是做到这一点需要机器人方面具有相应的智能^[19]。

6.2.5 网络时代的遥控机器人学

20 世纪 90 年代,互联网和移动通信技术得到迅猛发展,人们正在尝试通过这些通信基础设施遥控操作机器人的研究。

通过计算机网络进行遥控所特有的问题是通信时间延迟。此外还应该认识到,通过互联网或移动通信等一般通信基础设施进行遥控时,不同用户来自不同的地方,具有不确定性。

1. 时间延迟问题

众所周知,如果存在通信时间延迟问题,双向控制系统会变得不稳定^[20]。在时间延迟通信环境下双向控制的稳定性问题将在 6.3.3 节中进行详细说明。如果时间延迟过长,双向控制原本具有的“接近直接作业的作业形态”特征就会散失殆尽。举一个极端的例子,火星和地球之间的通信延迟约有 30min,在这种条件下,理论上构成稳定的双向控制是可能的,但实际上显然做不到。

如果来自环境的信息反馈滞后,那么任何操作都不得不“动一动,等一等”(move-and-wait)。为了弥补操作性能的恶化,人们提出若干种再现预测信息的方法。例如,有人提出 predictive display 方法^[21,22](图 6.23),将虚拟从臂影像与实际影像重叠起来产生不滞后

于主侧命令的响应;还有人尝试着将预测的环境接触力作为力进行反馈的方法^[23,24]。如果时间延迟很长,显然预测精度也会变坏,一个有效的办法是赋予从侧一定程度的自主性。JPL 研究小组指出,如果从臂应用柔顺控制,那么即使有时间延迟,也能顺利地完成销轴与孔的插入作业^[25],称之为“shared compliance”方法。如果作业不定形,那么希望随作业进度指示机器人应该做什么。为此,Funda 等提出了远程编程的框架^[26]。

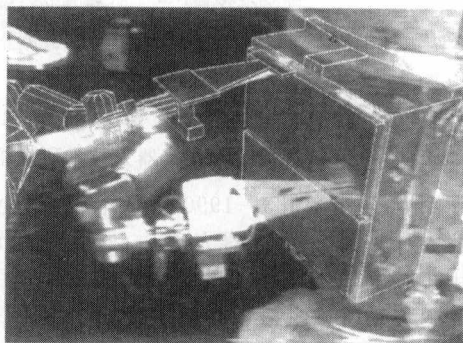


图 6.23 预告显示(Predictive Display)

(NASA/JPL/Caltech, Pasadena, California, USA 提供)

一些实际的太空实验使用了上述方法。例如,1993 年德国 DLR 的 ROTEX 项目^[27]、1997 年由 NASA 火星探测器(Mars Pathfinder)送到火星上的小型火星探查车“索迦纳”、1998—1999 年搭载在日本技术试验卫星 VII 型上的机器人手臂的轨道实验^[28],以及搭载在同一卫星 VII 型上的多功能手的实验^[29]等。

2. 操纵者和场地的不确定性问题

互联网和移动电话为代表的移动通信设施的迅速普及,无论何时、何地、何人都可以为我们提供连接世界各地的计算机网络环境。只要我们身边有标准浏览器,按照规定的通信协议(TCP/IP)、数据描述语言(HTML,XML)和程序(JAVA),在全世界的任何地点均能对互联网信息进行访问。

与互联网的普及相呼应,人们开始将操纵型机器人连接到互联网上去,尝试利用互联网所具有的“任何时间、任何地点”的特征进行遥控。澳大利亚和美国几乎同时(1994 年)在世界上最早开展了通过标准 Web 浏览器进行遥控的尝试。Goldberg 的 Mercury 项目^[30]就是其中之一,他在 1995 年将标准 Web

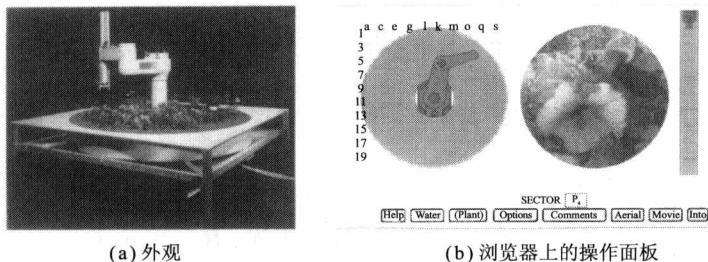


图 6.24 Telegarden(1995 年至现在,设置在澳大利亚的 Ars Electronica Museum s
http://telegarden.aec.at)(由加利福尼亚大学伯克利分校 Ken Grolberg 教授提供照片)

浏览器用于远程花园^[31](图 6.24)。这是一个利用遥控机器人护理花坛(定期浇水等事情)的实际培育花草的网站。如图 6.24 所示,用鼠标点击浏览器上显示的机器人作业区域内的任意点,就可以操纵机器人进行作业。在这个开放的网站上,除接口界面的标准化问题外,还存在必须同时应对多个人点击要求的问题。为此既可以通过排队来简单地解决该问题,也可以尝试由同时访问的多个用户进行表决的方式决定机器人的动作。

随着移动通信技术的进一步发展,从 1999 年开始连移动电话这类便携终端都可以通过无线网直接与互联网连接了,使互联网“任何时间、任何地点”都可以连接的便利性更上一层楼。2003 年,一些企业发布了便携终端遥控家用保安机器人的理念模型,可以预见家用机器人在市场上热销的日子已经不远了。但是,在实际普及之前,终端仍然面临着通信容量、显示能力、操作功能局限的问题,此外安全性也是一大困扰。

6.3 操纵型机器人的控制理论

6.3.1 主从系统的建模

本节将从控制理论的角度阐述典型的操纵型机器人——主从系统机器人的控制问题。本节首先介绍系统的建模方法,然后从 6.3.2 节开始陆续解释双向控制的稳定性问题、异构机械手坐标变换问题、在通信环境下时间延迟的双向控制问题。

先考虑图 6.25 所示的单自由度主从系统。主臂、从臂的动态特性可分别表示成如下方程式:

$$\tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (6.1)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (6.2)$$

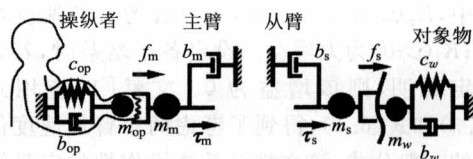


图 6.25 单自由度系统的模型

式中, x_m 、 x_s 分别为主臂、从臂的位移; m_m 、 b_m 分别为主臂的质量和驱动部分的黏性系数; m_s 、 b_s 分别为从臂的质量和驱动部分的黏性系数; f_m 为操纵者施加给主臂的力; f_s 为从臂施加给环境的力; τ_m 、 τ_s 分别为各个手臂驱动器的驱动力,其施加的方式则根据控制规律的不同而不同,如图 6.26 所示,主从系统的传统控制系统可以描述为如下数学方程式:

$$\tau_m = \begin{bmatrix} K_{mpm} + K_{mvm} \frac{d}{dt} & K_{mfm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{mps} + K_{mvs} \frac{d}{dt} & K_{mfs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$\tau_s = \begin{bmatrix} K_{spm} + K_{svm} \frac{d}{dt} & K_{slm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{sps} + K_{svs} \frac{d}{dt} & k_{sfs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

即用手臂各自的位置、速度、力的线性组合来表示手臂驱动力。在 6.1.3 节中,典型双向控制方法中可以如下设定上式一般描述公式

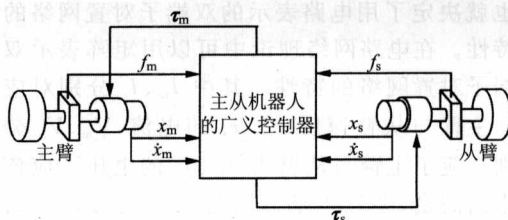


图 6.26 主从机器人控制系统的广义表现

中的各个增益:

[对称型]

$$K_{mpm} = K_{mps} = -K_p, K_{mvm} = K_{mvs} = -K_v,$$

$$K_{spm} = K_{sps} = K_p, K_{svm} = K_{svs} = K_v$$

[力反射型]

$$K_{mfs} = 1.0, K_{spm} = K_{sps} = K_p,$$

$$K_{svm} = K_{svs} = K_v$$

[力反馈型]

$$K_{mfm} = K_f, K_{mfs} = K_f + 1,$$

$$K_{spm} = K_{sps} = K_p, K_{svm} = K_{svs} = K_v$$

式中, $K_p(>0)$, $K_v(>0)$ 为位置增益和速度增益; $K_f(>0)$ 为力增益。设定各个增益时, 若无特定说明, 则该增益为 0。文献[1]应用式(6.3)和式(6.4), 得到了考虑两手臂加速度信号的一般公式, 该文献对系统操作性的定量评价方法和实现理想响应的条件进行了讨论。

有时可以把机械系统的速度转换为电流, 将力转换为电压, 于是可以改用电路网络表示机械系统。实际上在过去也一向是使用电路网络对主从系统进行分析。此时主从系统就等价成如图 6.27 所示的双端子对置网络系统。图 6.27 中, 操纵者与环境被表示成阻抗, 操纵者的输入用电源电压表示。电路网络丝毫没有改变问题的本质, 其优点是使系统更紧凑, 完全可以应用电路网络理论适用已有的概念和思路。

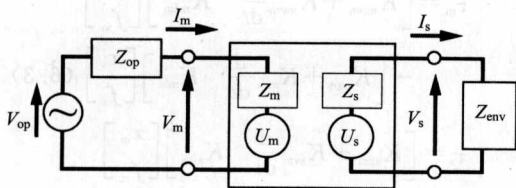


图 6.27 主从机器人系统的电路表示

如果用式(6.1)、式(6.2)给定手臂的动力学特性, 用式(6.3)、式(6.4)给定手臂的控制规律, 那么就能决定主从系统的特性, 因此也就决定了用电路表示的双端子对置网络的特性。在电路网络理论中可以用矩阵表示双端子对置网络的特性。其中 I_m 、 I_s 分别对应于主臂与从臂速度 \dot{x}_m 、 \dot{x}_s 的电流, V_m 、 V_s 分别对应于主臂与从臂力 f_m 、 f_s 的电压。应该指出的是, 在这里部分符号的方向可能与通常电路网络理论中电流和电压的表示方法不同。

[阻抗矩阵] $Z_{mss} = [z_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} V_m \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ -I_s \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

[电流矩阵] $Y_{mss} = [y_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} I_m \\ -I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ V_s \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

[混合矩阵] $H_{mss} = [h_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} V_m \\ -I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m \\ V_s \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

[散射矩阵] $S_{mss} = [s_{ij}]$

$$\begin{bmatrix} (V_m - I_m)/2 \\ (V_s + I_s)/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (V_m + I_m)/2 \\ (V_s - I_s)/2 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

在这些矩阵中能表现主从系统的理想状态, 即“让操纵者感觉宛如操纵直接作业系统”的矩阵有混合矩阵和散射矩阵。在电路中, 理想状态相当于 $I_m = I_s$, $V_m = V_s$, 将此关系代入, 得到理想状态下的矩阵为

$$H_{mss}^{ideal} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$S_{mss}^{ideal} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

在 6.3.2 节有关系统稳定性的讨论中, 散射矩阵是十分有用的。

6.3.2 双向控制和稳定性

一般来说, 严格讨论主从系统的稳定性相当困难。这是因为系统中包含了环境和操纵者的动力学特性。如果用线性模型近似环境和操纵者的动力学特性, 可以从系统的特征根来判别稳定性。但是环境和操纵者的动力学特性本质上是非线性的, 而且因为其特性一般都是时变的、未知的, 因此即便能够近似成线性, 对所有类型的环境计算特征根是不可能的。

由于这个缘故, 人们认可有关主从系统的稳定性问题只限于检查系统的被动性。被动性有各种定义, 直观地说, 被动系统就是自己不产生能量的系统。涉及被动性的讨论始于 1957 年, 当时 Burnett^[32] 指出对称型是被动的; 其后, 在 1988 年 Raju^[33] 指出正定的实数阻抗矩阵是稳定性的充分条件; 1989 年 Dudrangne^[34] 建议必须将操纵者视为被动; 其后的 1991 年, Colgate^[35] 给出如下式所示的主

从系统散射矩阵结构奇异值的条件,至此稳定性条件的判断问题才暂告一个段落。

$$\mu_{\Delta}(S_{\text{mss}}(j\omega)) \leq 1, \quad \forall \omega \quad (6.11)$$

式中, $\mu_{\Delta}(\cdot)$ 是表示构造不确定性的某个方块构造 Δ 的矩阵结构奇异值,如果是属于主从系统,那么 Δ 具有与后述的 Δ_{mss} 相应的方块构造。结构奇异值是 Doyle^[36] 为评价结构不确定性系统的鲁棒性提出的,是对矩阵奇异值的一种扩展。在主从系统中,主从系统可视为图 6.28(b) 中的广义对象,而与对象连接的操纵者和动态环境可视为结构不确定的方块,这样就能够计算结构奇异值。不过,有关结构奇异值的计算相当复杂,详情请见文献 [3], [37]。

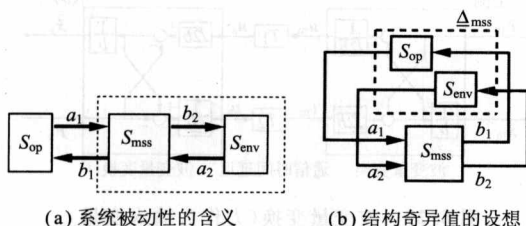


图 6.28 由结构奇异值确定主从系统的被动性条件

基于结构奇异值的条件是,即便主从系统在从侧与所有的被动环境处于接触的状态从主侧观察的该系统成为被动的充分必要条件。比起散射 H_{∞} 范数小于 1 的主从系统自身的被动性条件来,这个条件更为宽松一些。亦即按照结构奇异值条件求解的结果并非主从系统自身二端口网络(图 6.28(a) 中的 S_{mss} 方块)的被动性,只是从与任意环境接触的主从系统的主侧看的单端口网络(图 6.28(a) 中被虚线围着的方块)的被动性。若将图 6.28(a) 改成图 6.28(b),则用 S_{mss} 表示的系统与具有 Δ_{mss} 构造不确定性的鲁棒稳定性问题是等价的。

结构奇异值条件的含义是主从双方的比例尺明显不同,即所谓的缩放遥控操作状态。这里,假设位置与力的比例尺为 $\alpha(>0)$, $\beta(>0)$,并把满足关系 $I_m = \alpha I_s$, $V_m = \beta V_s$ 视为缩放遥控操作的理想状态。该理想状态的散射矩阵为

$$S_{\text{mss}}^{\text{ideal}} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha-\beta}{\alpha+\beta} & \frac{2\alpha\beta}{\alpha+\beta} \\ \frac{2}{\alpha+\beta} & \frac{\alpha-\beta}{\alpha+\beta} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

实际上计算该矩阵的最大奇异值,显然只有

当 $\alpha\beta=1$ 时,式 $(| \alpha\beta - 1 | + \sqrt{(\alpha^2+1)(\beta^2+1)}) / (\alpha+\beta) \geq 1$ 中的等号才成立。即使处于这种理想状态,因为微操作中 $\alpha>1, \beta>1$,故系统自身也不是被动的。下面我们试求该矩阵的结构奇异值 $\mu_{\Delta}(S_{\text{mss}}^{\text{ideal}})$ 。设此时 $S_{\text{mss}}^{\text{ideal}}$ 的各个元素为 s_{ij} ,则结构奇异值用 $\gamma(>0)$ 标定的矩阵

$$\begin{bmatrix} s_{11} & \gamma s_{12} \\ \frac{1}{\gamma} s_{21} & s_{22} \end{bmatrix}$$

的最大特征值的最小值给出^[3],实际上,当 $\gamma=1/\sqrt{\alpha\beta}$ 时被最小化。此时,无论 α, β 的取值如何,最大奇异值均成为 1,显然这个理想状态是稳定的。

按照被动性来讨论稳定性的时候应该注意的一点是,稳定条件是在操纵者视为被动的场合下才成立的。在人自身被视为被动的条件下,如果人操作的系统也是被动的,那么包含人在内的整个系统(无论操纵者如何)都可以被视为稳定的。但是,实际上人自己能够控制本身的工作,即使环境是简单的弹簧质量阻尼系统,人也能任意地(甚至设定成负阻尼运行)将该系统的振幅放大。不过,通常人们很容易稳定操作弹簧质量阻尼这类被动系统,因此可以接受被动性作为稳定性的条件。

反过来,即使是不满足结构奇异值条件的系统,操纵者也有足够的能力稳定操作该系统。例如,6.1.3 节的双向控制,尽管对称型满足结构奇异值的稳定条件,而力反射型、力反馈型则都不满足这个条件。可是在使用上,无论是力反射型还是力反馈型,人们均能稳定地操作它们,即适用于这些控制的系统有很多。

如上所述,在很好理解这些讨论的假定和性质的基础上,如果能够善于利用基于被动性的稳定性理论,那么无需环境或操纵者参数也能够充分讨论稳定性。由于求取结构奇异值时一般需要进行反复计算,而掌握计算方法本身很难,所以随场合的不同,有时结构奇异值条件被限制于上限值和下限值之间。如果是单自由度的系统,结构奇异值条件与 Llewellyn 条件是等价的^[38]。1952 年,有人就在关于通信系统稳定条件的研究成果中揭示了这一点,而 1999 年 Adams 和 Hanaford 将这个条件应用于触觉仿真稳定性的讨论中^[39],在机器人学领域这个条件也为众

人所熟知。

6.3.3 时间延迟通信环境下的双向控制

众所周知,在存在时间延迟的通信环境下,传统的双向控制系统是不够稳定的^[9]。对于时间延迟通信环境下双向控制的问题,Anderson 和 Spong^[40]最早揭示了明确的解决途径。他们引用通信工程学的散射理论,不是以通常的位置、速度及力的形式进行通信,而是将这些物理量进行散射变换后再进行通信,这样有时间延迟的信道就变成被动的了。继 Anderson 和 Spong 之后,Niemeyer 和 Slotine^[41]把通常的位置、速度和力进行散射变换的结果称为“波变量”。在本小节中将简单介绍在时间延迟通信环境下基于波变量的双向控制方法。

在基于波变量的方法中,主侧和从侧各自的速度和力被变换成用下式定义的波变量 u_m 和 v_s :

$$u_m(t) = \frac{b\dot{x}_m(t) + F_m(t)}{\sqrt{2b}} \quad (6.13)$$

$$v_s(t) = \frac{b\dot{x}_s(t) - F_s(t)}{\sqrt{2b}} \quad (6.14)$$

式中, $\dot{x}_m(t)$ 、 $\dot{x}_s(t)$ 分别为时刻 t 在主侧和从侧各自信道端点的速度; $F_m(t)$ 和 $F_s(t)$ 分别为力; b 为特征阻抗,可以取任意正数,它也是决定基于波变量通道特性的参数。图 6.29 表示了在有时间延迟的信道中通过波变量进行信号传递的概念图。由图 6.29 可见,变换后的波变量 u_m 和 v_s 通过各自的信道被传递到相反的一侧,变为波变量 u_s 、 v_m 被接受。接受一侧的波变量 u_s 、 v_m 同样可以用式(6.13)和式(6.14)来定义,不过这里设从主侧到从侧的通信时间延迟为 T_1 ,反之设从侧到主侧的通信时间延迟为 T_2 。在时间延迟不变的条

件下,发送一侧和接收一侧的波变量有以下关系成立:

$$u_s(t) = \frac{b\dot{x}_s(t) + F_s(t)}{\sqrt{2b}} = u_m(t - T_1) \quad (6.15)$$

$$v_m(t) = \frac{b\dot{x}_m(t) - F_m(t)}{\sqrt{2b}} = v_s(t - T_2) \quad (6.16)$$

如果使用式(6.15)、式(6.16),波变量就能复原为通常的速度、力的变量。在进行波变量变换或波变量复原时,速度和力两者之中必有一个是输入,另一个是输出。在图 6.29 的例子中,选择力作为输入变量。

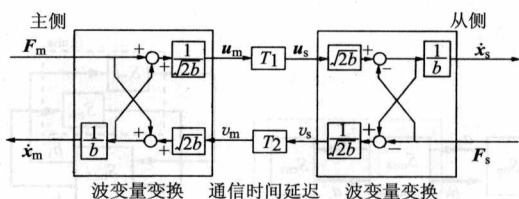


图 6.29 波变量变换(力作为输入变量)

图 6.30 给出在基于波变量信号传递信道两端,对称配置 PD 控制的双向控制系统的组成示例^[41]。由于波变量变换是基于速度的,所以 PD 控制的位置目标值可以经过对复原后的速度积分得到。图 6.31 给出基于该波变量变换的对称型双向控制方法的物理等价模型。如图 6.31 所示,由式(6.13)、式(6.14)所定义的波变量,与沿着分布弹簧和质量的传输通道行进的波是等价的,这正是它被称为波变量的理由。

波变量变换的传输通道是被动的,如果通过它在两端配置被动的控制系统,就能构成稳定的双向控制系统。不过,如果延迟时间 T_1 、 T_2 是变动的,就无法保证传输通道的

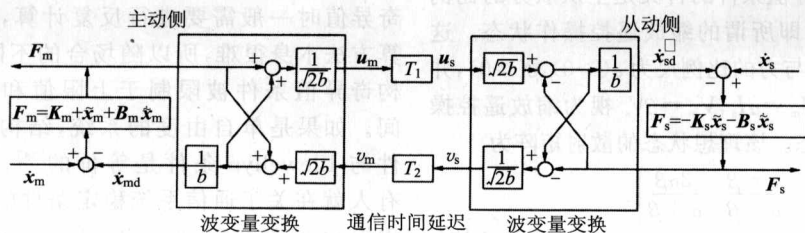


图 6.30 基于波变量变换的对称型双向控制方法

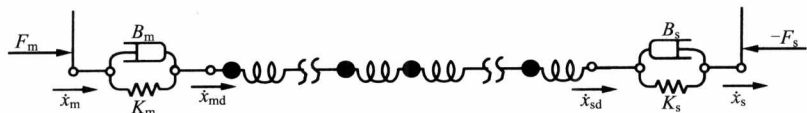


图 6.31 基于波变量变换的对称型双向控制方法的物理等价模型

被动性,即无法保证系统整体的稳定性。实际上,互联网等计算机网络中的通信时间延迟是经常变动的,因此有关处理通信时间延迟变动的这一类问题的研究正在进行中^[42~44]。

除了基于波变量的方法之外,应对时间延迟的方法还有基于 H_∞ 的最优控制、基于 μ 分析的方法^[45]、组合增益列表的方法^[46],以及简单 PD 控制的方法^[47]等。

横小路泰义

6.4 临场感操纵型机器人系统

操纵者远离机器人的工作现场,却能在逼真的临场感环境下直接操纵机器人完成指定作业,这种机器人的控制方式是远程控制理想方法之一。

也就是说,机器人充当操纵者的替身,代替后者来完成作业,机器人的工作状况就像操纵者手把手地帮助一样。对一些重要的工作,操纵者甚至可以取代机器人,执行任务时的感觉如同在亲自操作一样。这种对操纵者的替身,即机器人进行高水平远程控制的技术,或者说既能远程操纵又具有临场感的控制技术,一般称为临场感技术(telexistence 或 telepresence)。

在本节中首先介绍远程控制的基本概念,即临场感技术的原理、组成、应用等,同时也涉及一些视觉、听觉、触觉等感觉信息的再现方式。

6.4.1 临场感技术

1. 临场感技术的概念

说到临场感技术,首先应该在远处配置拟人机器人,确立人-机器人之间传递信息的通道。其次,实时地测量操纵者的运动和力状态等信息,弄清楚它的内部状态。再经由信息传递通道将这些内部状态传递给机器人,对后者的运动控制系统直接实施控制,据此忠实地再现人的动作,实现对机器人上的人造眼睛、头、手、脚等部位的控制。同时,由机器人上的人

工感觉器官测量得到的信息,也经由通道反过来悉数传递给操纵者一侧,利用操纵者周围的显示装置,再现给人的感觉器官。

以视觉为例予以说明。当操纵者朝自己打算查看的方向看过去时,机器人也朝同一方向看,其结果是,通过机器人上的人造眼睛传回的信息在操纵者的视网膜上所形成的图像实景就如同人站在实际现场所观察到的实景一样。当操纵者把自己的手臂拿到眼前,他看到的是机器人手臂而非自己的手臂出现在同样的位置上。这时可以说系统进入了状态。

这样,人在作业时就完全能够运用自己过去的经验来处理自己的手与对象物,以及与周围空间的关系了。机器人作业时接触物体的感觉被再现成对手皮肤的刺激,人的感觉就如同自己直接接触及到那个物体一样。

临场感技术给人的感觉甚至超出人原本所能感觉的范围,在更大程度上扩展人的感觉能力。于是操纵者得以利用机器人所感觉到的放射线、紫外线、红外线、微波、超声波以及超长波等所谓的超感觉信息。譬如,将红外线传感器测量到的信号变换为可见光信息,能为操纵者现场操作提供方便,虽然作业现场是黑暗的,但会给操纵者一种置身于明亮的场地干活的错觉。

这些超感觉信息还能重叠显示在普通视觉显示器上,甚至在传统上无法进行图像重叠的三维图像也能做到。例如,把物体所处的地方和距离作为空中影像显示出来,或者剔除原本能够看到的图形,仅仅显示现场产生变化的那部分图像等。

临场感技术与计算机图形技术相结合,能够创造一个虽然与实际世界不同,但是与实际世界极其相似的虚拟环境,这叫做人工现实感。

计算机图形学一方面可以随人的运动进行实时变化,另一方面能够在人的周围生成一个真实般的人造环境。置身于这个人造环境中,转动人的头部就能浏览到相应方向上的场景,人移动,虚拟世界也随之发生变化,

因此可以获得逼真的体验。例如,人辗转在虚拟迷宫之中时,会产生打开虚拟房门进入房间的感觉。

临场感技术基本系统有两个目标:一个是系统中机器人能够与人一般灵巧地操纵工具或机械作业;另一个是实现机器人机构的拟人化,不过作业时还能增大人的力气。例如,抓取重物,能够产生举重若轻的临场感效果。

20世纪60年,美国研究了一种铠装型机械式人力放大装置,人置身于装置中进行操纵。由于当时机器人技术还未成熟,加上人置身于机器人中操纵的设计思想本身也存在一定的危险,因此该装置至今未能实现实用。如果将临场感概念用于解决这个问题,就既能避免人进入人力放大机械装置的危险,又能

让操纵者在置身其间操纵般的感觉中实现控制和作业。

其实,临场感技术也可以反过来缩小作业力。例如,血管修复手术完全可以像处理软管内的作业一样,使之具有临床操作的感觉。

综上所述,临场感技术有十分广泛的应用,在工厂、车间、联合企业的危险恶劣环境作业、核电站的检修和修理作业、太空或深海的勘探、修理作业、装配作业、灾害搜索、救生和修复作业等,甚至于日常清扫作业、土建作业、农林水产业、医疗福利、警察、探险、业余娱乐,及至飞行员、驾驶员的培训等。

应用临场感技术的机器人属于智能机器人。操纵者有可能同时控制多台机器人。图6.32中表示的人机系统就是一个例子^[1]。

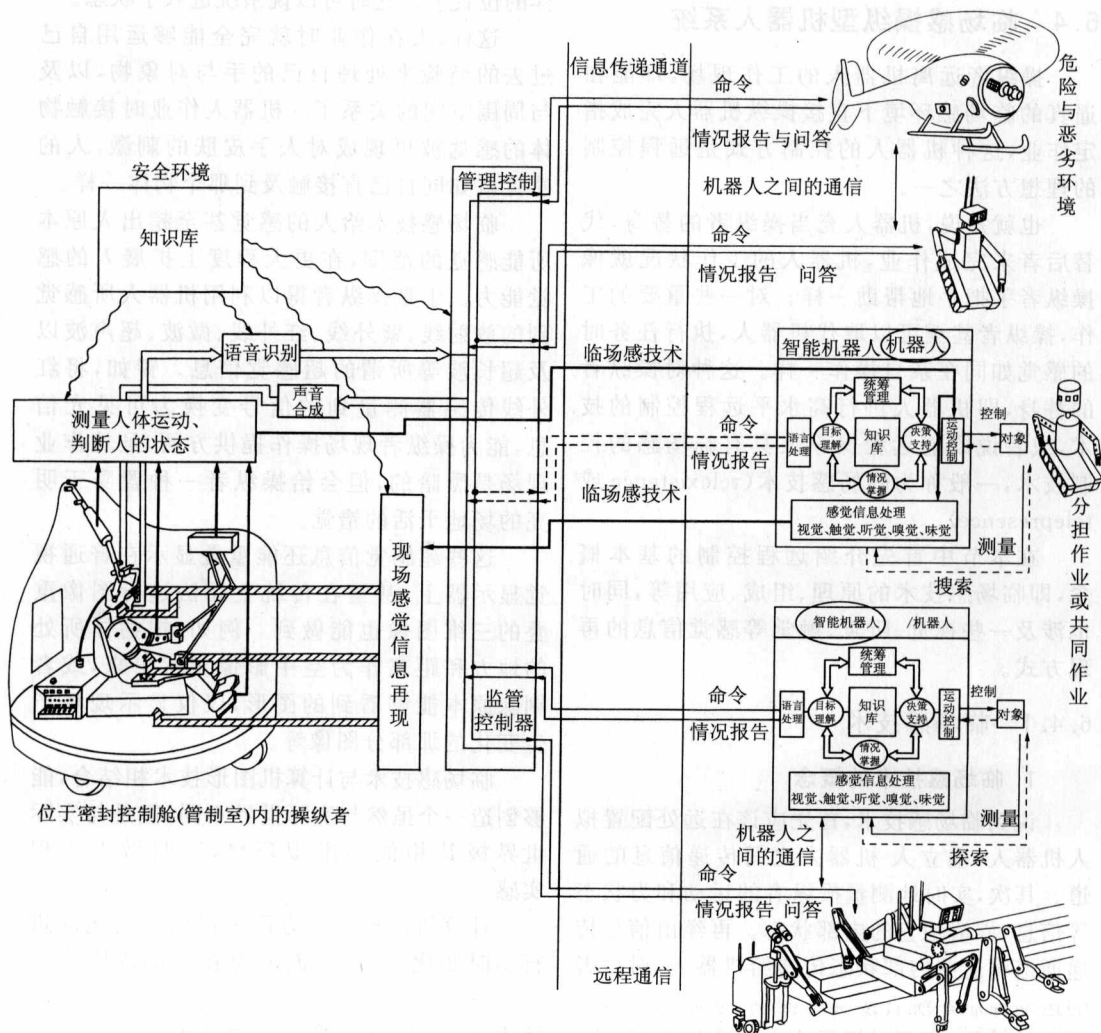


图 6.32 临场感技术中人-机器人系统的结合

由图 6.32 可见,操纵者位于密封控制舱(管制室)内发出命令,多台自主移动智能机器人按照操纵者的命令分担远程作业环境中的各种任务,必要时还能进行协同作业。

监管控制器的任务是进行作业分配、作业规划和调度,各台智能机器人将相关工作进展的情况分别反馈回监管控制器,在这里加以整理后,用某种形式指挥操纵者(例如,用语音)。操纵者用接近自然语言的词汇下达命令和传递判断的结果,再经过语音识别装置和监管控制器,以命令的形式下达给各台智能机器人。智能机器人理解了命令的含义,运用自己的智能做出反应,完成要实现的目标。

机器人的传感器信息是机器人智能活动重要的信息来源,操纵者也能随时监控这些信息。如果智能机器人面临独自无法应对的困难局面,那么或者依照智能机器人的请求,或者根据操纵者自己的判断,向该机器人发出适当的控制命令。

如果靠这些命令仍然无法解决问题,那么操纵者可以将该机器人的控制切换到临场感模式直接施加控制。

2. 临场感系统的基本构成

这里以视觉为例说明临场感系统的基本构成方法^[2]。

以往研究的典型构成方式是在相距遥远的两地同时建立称为全波阵面的视觉环境,它是一种全方位的全景立体投影装置或自动虚拟环境(CAVE: Cave Automatic Virtual Environment)。在远处机器人所在地周围建立一个封闭曲面,用该封闭曲面上的多个点来记录包含在该封闭曲面内的波阵面。把这些点的数值传送到另一侧的操纵者处,在他的周围重建同样的封闭曲面以便再现波阵面(图 6.33(a))。不过,靠这个办法很难实现临场感,其理由如下:

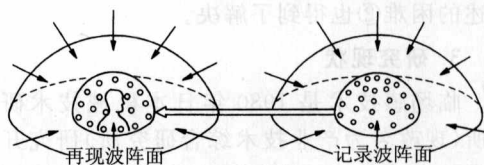
① 要想构成与实物大小一般的环境封闭曲面,记录和再现装置将非常庞大。如果仅将它再现预先记录信息的剧场之用,虽然有效,但是它不适合实时交互的用途。从当前的技术水平来看,要达到实时信息的记录和再现,即使是全息摄像技术也是徒劳的。

② 用三维且实物大小的形式实时交互地

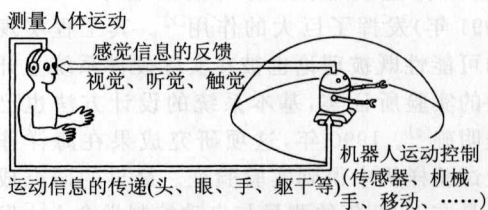
记录与再现接近人体大小的物体,在技术上还存在困难。特别是如果操纵者观察自己的手和观察机器人的手的位置之间存在差异的话,就不会有真正的临场感。在临场感技术中,看到机器人手的地方必须能看见操纵者自己的手,但是由于操纵者的手和显示出的机器人的手会产生干涉,要想实现这个要求具有一定的难度。因此,做不到自己成为机器人并处在机器人所在的位置的那种真正的理想的存在感,也难以达到背景-作业对象-机器人手的关系就如同自己处于机器人之中那样的状态。

图 6.33(b)给出以机器人技术和人的各种感觉器官为基础实现临场感技术的基本构成方法。

图 6.33(a)中力图同时再现相隔两地的全波阵面,但是如果考察一下人的视觉构造就会发现,实际上不需要同时再现所有的全波阵面。



(a) 基于波面再现原理的三维显示法



(b) 利用人的视觉原理和使用临场感的三维显示法

图 6.33

人的视觉机理是指在视网膜上形成的两幅图像。实际上,某一瞬间人的视网膜上只能得到视野全波阵面内的一部分图像,而且它们随着人的运动或眼的运动实时地发生变化。由此可知,人就是以那两幅图像在头脑中生成三维世界的,并再投影到物体实际存在的地方。因此,实时且忠实地测量人头部的运动和眼睛的运动,让机器人的头部和眼睛同步配合运动,这时如果将机器人视觉输入装置中呈现的两幅图像传递到操纵者一侧,再借助于恰当的显示装置将它们正确地

且无时间延迟地呈现在人的视网膜上,那么人的视网膜像就与他站在机器人的位置上直接观察到的实景完全一样。亦即用这些图像在人的头脑中构造的三维世界与现场看到的实景别无二致,可以向现实世界再投影。

综上所述,利用由人的运动测量装置、显示装置及从侧机器人构成的系统,可以将部分且连续地获取波阵面,从而大大增强视觉记录和再现装置成功的可能性,也就解决了前面①中所叙述的困难问题。

现在还剩下困难问题②。在临场感中,操纵者距离机器人一侧太远,对那里环境的情况一无所知,只有靠来自远程机器人的视觉信息显示。

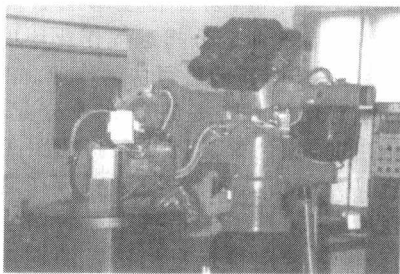
在另一侧,可以实时、忠实地测量人的手和身体的运动,根据所得到的相关信息驱动机械手和躯体,一侧系统在构成上就能做到如果操纵者把自己的手放在眼前,机器人的手就也能出现在相同的位置上。这样一来,前述的困难②也得到了解决。

3. 研究现状

临场感技术是1980年日本机械技术研究所(现改名为产业技术综合研究所)研究开发出的自有技术,这项技术在大型研制计划“极限作业机器人”的研发活动中(1983—1991年)发挥了巨大的作用^[1]。其工程实现的可能性既被理论也被在实际硬件系统上开展的实验所证实,基本系统的设计方法也已经明确^[2]。1990年,这项研究成果在海洋作业试验样机中得到实验验证。最早的研究成果是在1982年的测量与自动控制学会会上^[3]发表的,相关专利申请在1980年提交。1980年,美国的明斯基也发表了临场感技术的概念^[4],1983年在ARAMIS的报告中提议把它用于空间开发,而有关军事应用的研究开发也一直没有间断过^[5,6]。

自1991年以来,日本临场感技术的研究是以东京大学为中心,从虚拟现实的角度出发,开展了面向计算机生成空间的临场感技术,以及通过虚拟现实(VR)空间面向实际空间的临场感技术的研究^[7]。最近,有人在研究所谓的相互临场感技术^[8],其含义是不仅操纵者有临场感,同时置身于机器人环境中的人既能感到机器人的存在,又能感觉到操

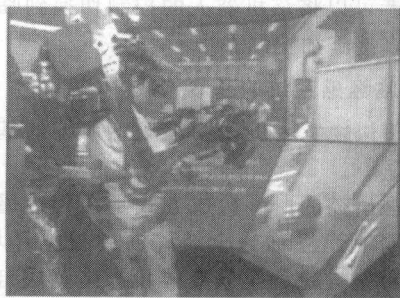
纵机器人的人的存在。



(a) 临场感技术实验机器人“特丽莎”(东京大学)



(b) 临场感技术实验主系统(东京大学)



(c) “人协调共存型机器人系统(HRP)”的超级座舱。
它用于拟人双足步行机器人的临场感遥控

图 6.34 拟人作业的临场感操纵型机器人
和临场感座舱

在日本应用产业技术研究开发计划“人协调共存型机器人系统(简称 HRP)”中有一个开发环节,就是用临场感技术现场控制拟人双足步行机器人。这项技术已经于2000年4月在临场感技术超级座舱的公开实验中取得成功^[9]。

1995年,日本通商产业省(现改名经济产业省)和东京大学还构想了一个通过网络的临场感技术项目,即 R^3 (real-time remote robotics),它目前也正处在大力研发之中^[10,11](图6.34)。

6.4.2 视觉信息和听觉信息的立体再现

1. 三维空间的视觉识别中的立体视觉要素

人在对三维空间中的物体进行视觉识别之际,会寻找空间中的各种特征,其中又可以分为单目成像时的特征和双目成像时的特征。此外,借助于观察者和对象物体各自的动作特征来进行识别也是十分重要的。

假设观察者和对象均处于静止的状态,那么从单目成像推导物体的三维形状,即产生立体视觉的重要因素可以列举如下:

- ① 水晶体的调节(accommodation)。
- ② 视网膜像的大小(retinal size)。
- ③ 线透视(linear perspective)。
- ④ 纹理梯度(texture gradient)。
- ⑤ 空中透视(aerial perspective)。
- ⑥ 重叠(overlapping)。
- ⑦ 亮度与纹理(light and shade)等。

双目成像产生立体视觉的重要因素除了上面几点以外还有:

- ① 聚焦(convergence)。
- ② 双目视差(binocular parallax, binocular disparity)。
- ③ 假如观察者和对象物体处于相对运动的状态,那么还应该附加一条重要因素,即运动视差(motion parallax)。

此外,对象物体的形态和色彩、观察视野的大小也会带来影响。此外,如果景深和感觉方面提供的特征信息较少,那么观察者就会产生一种距离不变或等距离的错觉^[12]。

2. 立体再现的方式

如果是理想的临场感技术再现方式,那么在1.中涉及的全部特征信息必须能够通过再现装置获得与直接视觉同样的效果。现在流行的三维空间重建技术可以分为两种:一种是以单目成像特征为主获得二维图像组成的景深,从两幅二维图像推导立体再现;另一种是借助于运动视觉从多方位获得观察信息的三维再现。

使用大屏幕进行景深图像再现时,利用透视、照明、对象物体运动等特征,通过大画面的合成效果能产生临场感。不过,这通常对远距离观察是有效的,对近距离观察反而

无效。

在立体图像的再现技术中使用双目视觉时,可以分为眼镜方式和面显示方式。

眼镜方式又可以分为同时方式和分时方式。所谓同时方式是同时显示两幅画像,按照颜色和偏振光的差异将其分离成为左图像和右图像。所谓分时方式是借助于液晶光阀,按照时间顺序将其分离成为左图像和右图像。

基于偏振光的同時方式,需要两台显示投影仪,眼睛的负担会比较轻。基于偏振光的分时方式虽然只需要1台显示投影仪,但眼睛的负担会比较重。

在面显示方式中,为了分离左右两只眼的图像,人们在图像显示一侧(而非观察一侧)采取了很多措施。例如,分离观察的方式有晶状双凸透镜板、类似蝇眼的复眼透镜板、双眼视差隔板、直角棱镜板等。这种方式的优点是不需要用眼镜,不过观察者的位置会受一定限制。

三维空间图像再现技术全面考虑了运动视差、双目视差、聚焦和调焦、视网膜成像大小等主要因素,依此研发出来的临场感最为逼真。这些研发成果中有波阵面图像再现方式(如激光全息照相技术或全方位屏幕技术),以及主动立体再现方式(如实时测量观察者的运动情况,让显示图像发生变化引起运动视差)。

3. 主动立体图像再现方式

立体图像显示装置是利用聚焦、双目视差、视网膜图像大小、水晶体调节等特征来获取现场的直接感觉的。此时,如果能利用观察者的运动适当变化对象的画面,正确地传递运动视差,根据这个原则就可以设计出主动立体图像再现方式。

临场感技术中的显示都属于主动立体图像再现方式。

图6.35表示了理想的视觉显示系统的构成方式。在机器人上有两台摄像机,它们的距离等于人双眼的间距 a ,搭载摄像机的人力机构产生的受控运动与人头的动作一致。

首先,测定操纵者眼睛的运动情况,如图6.35中的I所示;然后,控制调节摄像机和CRT显示稠密度的参数 θ_0 和 θ_r ,使之满足

$\theta_h = \theta_r$ 。由于 X_r 是一定的,故能同时调整摄像机的焦点。在操纵者一侧的图像显示器中,应该控制位于 CRT 前的透镜系统,使 CRT 图像显示器中的虚像位置达到 $X_h = X_r$,并且图像的大小满足 $I_h = I_r$ 。

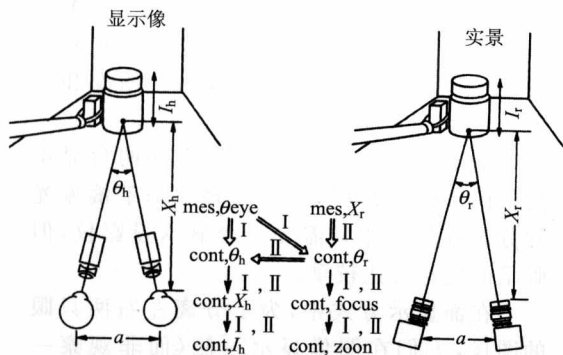


图 6.35 临场视、听觉再现系统的构成方法

为了产生运动视差的效果,应该在跟踪操纵者运动的同时,对机器人一侧的传感器实施同样的控制,不断将得到的图像信息在保持上述状态的同时再现给操纵者。

目前正在研发如下四种类型的图像显示装置:

- ① 被动连杆型。
- ② 主从型。
- ③ 阻抗控制型。
- ④ 头部搭载型。

无论如何,最理想的方式是具有 6 个自由度,即 3 个空间移动自由度和 3 个转动自由度。

在被动连杆型中,显示装置被安装在起重重力平衡的连杆上,并固定在操纵者的头部。这样一来,显示装置就始终能够跟随人的自由运动,满足在上述条件下完成空间信息的感知。不过随之也带来如何补偿黏性力和惯性力的问题。

在主从型中,采用磁力传感器、陀螺仪等轻型传感器来检测操纵者的运动,而位于人前的显示装置受控于人的运动,满足上述条件。由此带来的问题是如果传感器与操纵者的接触不严密的话,就容易产生小小的时间延迟或轨迹偏差。

阻抗控制型是在被动连杆型的基础上增加驱动器,达到补偿惯性力和黏性力的效果。但是随之产生的问题是系统过于复杂,使成

本上升(图 6.36)。

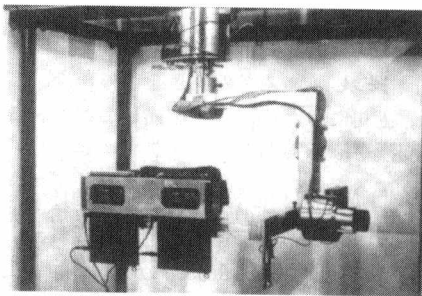


图 6.36 阻抗控制型立体图像显示(东京大学)

在头部搭载型中,为了减轻显示器的质量,将全部显示装置与头盔固定,戴在操纵者的头上。运动的测量采用磁力传感器,没有任何拘束。这种形式的优点是结构简单,自由度多,但是如果图像显示装置比较重的话,重力和惯性力都会给操纵者的头部带来负担。

4. 听觉再现技术

迄今为止,人们在听觉三维再现,即所谓立体声技术方面开展了大量研究。基于波阵面再现原理的听觉再现装置是把多个话筒安装在封闭曲面上进行录音,实时传送到安装在操纵者周围的多个扬声器中并重放出来。这是一种最简单的模仿方法,即通常的立体声技术。

在主动立体听觉再现技术中,在机器人头部相当于左、右耳朵的部位安装话筒,把话筒接收的声音信息用耳机分别传送到操纵者的左、右耳朵内。头戴耳机的步行者,虽然耳机跟随人的头部运动,听到的声音并未因此而发生改变,但音源的绝对位置却是变化着的,所以这种方式不能接收逼真的现场感觉。例如,声音从正面传来,如果此时头部左右运动,耳机里听到的声音仍然像是从正面传来的一样。但是在主动立体声再现技术中,先测量操纵者头部的运动,然后根据测量的结果控制机器人头部,因此,即使机器人的头部处于动态,音源的绝对位置并未发生改变,仅仅是操纵者或机器人与音源的相对位置发生了变化,所以操纵者听到的声音具有逼真的现场感觉。

人们还在研究只控制耳朵附近的音场,借助于头部跟踪实现所谓的反听觉方式。

6.4.3 触觉信息的再现技术

有关触觉信息再现技术的研究,比视觉和听觉再现技术的研究起步晚一些。关于力觉的内容已经在 6.1.3 节中做了介绍,在本小节中主要以触觉再现为重点做一个补充^[12]。

一般来说,触觉信息的再现与操纵方式有关。操纵方式有如下三种:

- ① 主机械手方式。
- ② 三维操纵杆方式。
- ③ 数据手套方式。

在所有的方方式中,如果能够直接给出三维位置和方向,那么这种操纵方式是最理想的。

主机械手方式已经在 6.1.2 节 3. 中做了详细的叙述。双向控制的主机械手一般在力反馈之外还要进行触觉信息反馈。不过,目前的触觉反馈主要是以接触信息的形式出现。

三维操纵杆方式以钢丝绳为主。多根钢丝绳把操纵杆吊在空中,操纵者能够按照空间 6 个自由度自由控制操纵杆。钢丝绳受驱动器牵引,反作用力还能反传,让触觉信息由操纵杆传回操纵者一侧。现在有人开始了基于陀螺仪效应的触觉信息再现技术的研究尝试。

把数据手套做成人手的形状,再配上光纤之类的传感器后能检测出手指的运动。手的位置和姿态的 6 自由度信息靠磁力传感器进行测量。力反馈的数据手套在市场上已经有销售。

触觉信息有如下三种再现方法:

- ① 浮雕状的凹凸形态再现。
- ② 对人的皮肤实施振荡刺激的再现。
- ③ 对人的皮肤实施电刺激的再现。

近几年来,电刺激皮肤的触觉再现技术有了一些进展,如可以选择皮下默克尔触盘、迈斯纳小体、帕西尼氏小体等触觉器官实施点刺激,今后该技术可望有更大的进展^[13]。

馆 晔

6.5 智能远程作业系统

6.5.1 智能远程作业系统的基础

1. 智能远程作业系统的必要性

在人难以进入进行作业的环境,例如,太

空、海洋、核能设施之中配置机器人,并使之按照人下达的命令进行作业,这样的系统称为远程作业系统。最原始的远程作业系统就是主从机械手。但主从机械手操作起来十分困难,需要操纵者掌握相当熟练的技能。操作侧与作业侧的通信时间延迟以及通信容量的限制,使主从机械手的操作变得越发困难。解决这些问题的出路在于大力推进远程作业系统的智能研究开发,这就是所谓的智能远程作业系统。

智能远程作业系统的特点是机器人接受人的命令去实施作业。人给机器人下达的作业命令可以分成不同的层次。机器人的命令层与运行周期、通信量有密切的关系,可概略如下(图 6.37)。

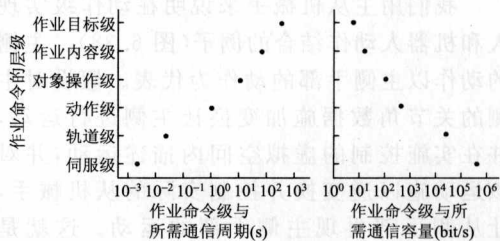


图 6.37 作业命令与通信周期及通信容量的关系

层次 命令周期和命令的例子

- ① 作业目标级: 例 disassemble valve
周期 约 5min
需要的通信容量 约 5bit/s
- ② 作业内容级: 例 remove handle
周期 约 1min
需要的通信容量 约 15bit/s
- ③ 对象操作级: 例 approach handle
周期 约 10s
需要的通信容量 约 400bit/s
- ④ 动作级: 例 move-to(destination)
周期 约 1s
需要的通信容量 约 400bit/s
- ⑤ 轨道级:
周期 约 20ms
需要的通信容量 约 24Kbit/s
- ⑥ 伺服级:
周期 约 2ms
需要的通信容量 约 384Kbit/s

决定命令层级的因素有人-远程机器人之

间的通信时间延迟的程度、通信容量的限制、命令操纵者的熟练程度等,遥控的形态也会因此而有所不同。上层通信命令的间隔最长,对通信时间延迟和通信容量的限制要求不高,人的负担也最轻。层级越往下,发送命令的频度和通信的容量逐渐增大,使操纵者的负担也逐渐加重。现实的问题是,人不可能发出伺服级的命令来;反过来,层级越高,对机器人的自主性也就是智能的要求也越高。

2. 智能的基本构成

从人和机器人交互作用的观点来观察有关远程作业系统的智能化研究可以发现一个共同点,即如果将计算机安排在人与机器人之间,运行高度智能的计算机软件,就能起到增加两者结合的灵活性的目的。

我们用主从机械手来说明在动作级实现人和机器人动作结合的例子(图 6.38)。主侧的动作以主侧手部的动作为代表。假设对主侧的关节角数据施加变换让主侧进行运动,并在实施控制的虚拟空间内描述运动,并对该运动施以逆变换并控制实际的从机械手,让从侧手部再现主侧手部的运动。这就是说,为了对人与机器人的结合施加控制,应该在虚拟空间中描述运动,通过虚拟空间的媒介作用能使各种控制策略(即智能功能)具有一般性,为机器人实现智能提供便利。

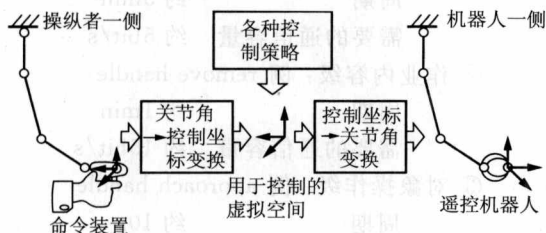


图 6.38 远程作业系统智能化的原理

6.5.2 智能远程作业系统的历史

1. 监管控制方式

(1) 系统概要 远程作业系统智能研究的早期成果可以举 MIT 的监管控制(supervisory control)远程机械手系统^[1]。这个系统的组成是:用机器人上的传感器获取作业环境的信息,人与计算机(机器人)以对话的方式输入机器人手臂操作物体的作业动作命令,计算机(机器人)依据这些命令实施作业。总之,这个

系统的主要目标是只要选择计算机一级的全局命令执行系统,就能减轻作业系统的操作负担,而无需对机器人进行直接的手动控制。为了描述自动动作的交互命令,系统开发了一种称为 MANTRAN^[2]的机器人语言,还开发了利用机器人获得的物体位置信息的作业程序规划系统^[3],虽然它们还只是一些初步的成果,但它毕竟算是有关远程作业系统智能的综合性研究。

(2) 背景 监管控制方式的思想可以看成计算机控制思想的直接发展。自从机械手被引入计算机控制以来就一直没有偏离过这个思想。犹如计算机诞生不久就产生出了人工智能这样的想法一样,将机械手的计算机控制与机械手的智能结合起来也是顺理成章的事情。机器人语言在早期就成为人工智能领域中的热门研究对象之一,两者结合形成所谓的机器人规划(作业规划方法),而它成为机器人作业系统智能在原理性、先导性方面一脉相承的研究课题。

(3) 智能的定位 监管控制方式中的语言命令虽然简单,但它却是智能接口界面。在具有时间延迟背景的远程作业系统中,智能定位在所谓的“move-and-wait”方式,操纵者只简单地操纵主机机械手,剩下的就是等待从侧的机械手到完成给定的目标值。

2. JPL 系统(基于 VR 技术的系统)

(1) 系统的概要 美国 NASA 的研究机构之一的喷气推进研究所(Jet Propulsion Laboratory)一直致力于空间远程作业系统的研究开发^[4]。该研究的特色在于针对操作环境(操纵者)与远程系统(机器人)之间存在大的时间延迟的远程作业系统,所采取的研究方法的特点是基于虚拟现实系统的操纵者支持工具。具体说来,就是在虚拟环境中采用高性能的力觉再现主机机械手代替人进行装配之类的工作。在这个系统中,机器人机械手抓取的物体与环境发生接触,或者作业时的反力都能够被仿真。该系统是将得到的作业动作使机器人再次执行的系统。

(2) 背景 伴随计算机语言和人工智能技术的新发展,第 2 代系统也被开发出来。该系统基本上以监管控制为平台,又积极地引入自 20 世纪 80 年代以来得到显著发展的

虚拟现实(VR)技术,它把重点放在支持操纵者方面,如开发机器人作业命令生成,然后对生成的作业动作进行事前确认等。

(3) 智能的定位 用于VR环境的作业命令输入,这也属于一种智能接口。更为高级的智能系统应该具有这样的功能,即操纵者根据虚拟环境发出动作,由此再现出作业动作,生成机器人语言描述的作业命令,并把命令送至远程机器人一侧执行^[5]。此外,像动作级和知识级的自动整合功能(与操纵者的行动理解方法相关)^[6]、群体机器人远程作业命令接口^[7]等都属于由远程作业系统智能研究衍生出来的很有趣的课题。

3. 基于装配作业语言的系统(人工智能方法)

(1) 系统概要 在日本原通产省的极限作业机器人计划中,以原电子技术综合研究所为核心展开了智能远程作业技术概念的研究^[8]。该研究涉及的系统大致可以分成两种类型,其中之一是基于模型的机器人学方法^[9]。

这个系统由环境建模系统、编程系统、作业实施监管系统等三个子系统构成。环境建模系统借助于激光指示器示教的方式以获取作业对象物的表面信息,从而求取物体的几何形状和位置与姿态,这是建模的基础数据。

根据上述基础数据,运用多媒体显示技术生成作业程序。所谓多媒体显示技术就是在一个画面中同时运用多种媒体表现形式,如TV摄像机拍摄所获取的实际图像、图形、文本等。它的一个显著特点是具有在实景图像上叠合环境模型的所谓重叠功能,另外还有在环境示教系统对获取的数据进行确认,对机器人系统生成的作业规划进行事前确认仿真等特点。

在实施装配作业时应该按照“人工技能”来划分动作的步骤。由于机器人根据自身的传感器信息,一边判断操作的物体和装配对象的相互关系,一边进行作业,故所谓人工技能就是一种能适应环境模型和实际现场的误差进行鲁棒性作业的方法。

(2) 背景 从20世纪70年代后半期到80年代初期,用于装配作业自动化的机器人语言研究十分盛行。其主流是定义机器人

作业环境的世界模型数据结构,并以此为基础开展对装配顺序和回避碰撞动作规划的研究。这些规划方法再加上基于作业对象和作业环境的几何模型,确立了基于模型的机器人学的基本概念。

(3) 智能的定位 本系统的环境模型、作业规划、人工技能均围绕基于模型的机器人学,也就是机器人的基本人工智能展开。环境建模系统就是使用激光指示器示教方法使自身成为智能远程作业系统的一个很好的例子。

4. 基于与人协调作业的系统

智能远程作业系统的再一个实例是MEISTER系统^[10],它的重点是强调人与远程机器人的对话性、协调性。系统的特点是人与机器人能够在两个层级——动作层和知识层上协同作业。所谓知识层是指在操作对象物体的形状数据、位置/姿态空间信息基础上,用面向对象的框架来综合描述物体的各种操作和作业顺序的层次,具体说它包括物体的物理属性数据库、世界模型功能、作业程序库等。所谓动作层是指在主机械手和示教盒等直接操作命令的基础上,增加选择适合作业动作自由度的支持功能。

知识层与动作层是通过示教作业方法,即人与机器人协调作业的方法结合在一起的^[11]。这种结合考虑了远程作业系统特有的环境非结构化和未知条件下的实时作业要求,还考虑了机器人实行自动作业时模型库可能出现的数据未知的情况,以及此时在不间断作业的前提下由人示教加以补充的措施。

(1) 背景 基于与人协调作业的系统诞生受到机器人语言的强烈影响。该系统正是由于主侧和从侧之间有机人语言的沟通才产生的,在机器人语言系统基础上又集成了约束动作的支持、示教作业的执行、知识库等。

(2) 智能的定位 这个系统设计了各种智能接口,如“作业示教法”(通过示教弥补世界模型数据的不足使作业得以完成)、“确认执行法”(以机器人的基本动作为单位进行作业预演,避免世界模型与实际环境的失配招致作业的失败)、利用语音信息的作业预演等。还开发了确认作业状况的支持方法^[12]。

方法控制作业状况监视摄像机随作业一起做转动、倾斜、变焦等联动。这些方法对远程作业系统的监视功能的智能化有推动作用。

5. 基于网络的系统

(1) 背景 从系统整合的观点看,网络技术的影响是不可忽视的。20世纪90年代是互联网普及的时代,这不仅限于机器人领域,整个世界都是如此。在机器人领域中,受互联网影响最大的应该说是远程作业机器人系统。

(2) 系统概要 简单地说,远程作业系统就是从一个装置中分离出操作面板,然后通过某种通信手段又将两者联系起来。如果它们彼此之间没有力和能量的直接传递,只剩下信息的沟通时,它们就构成了一个远程作业系统。可见远程作业系统的核心在“信息”传递这一点上。

只要保证信息的沟通,计算机网络就能够把它传播到世界各地。如果在网络的一处设置操作环境,另一处设置工作环境,那么就能构成一个最低限度的远程作业系统。在互联网上采用标准浏览器遥控国外机器人的系统,就是一个具有象征性意义的远程作业系统^[13]。通过机器人交换现实世界信息的“R³ (Real-time Remote Robotics, 实时远程控制机器人技术)”^[14]也只有在互联网的前提下才能出现。当然,时间延迟的存在仍然一如既往,它照旧被当作网络信息传递的特征成为研究的课题^[15]。

(3) 从智能的观点来定位 网络技术属于综合技术,只要符合网络标准协议,任何设备均可以互相连接。我们先不管综合的结果在功能上有没有意义,机器人的各种主要元器件在网络中至少有可能发挥出不同于制造所设想的用途。远程作业系统原本就是一个综合性的系统,随着网络技术的发展,当然也会呈现一个新的局面,但是,充分利用能够自由地综合各种功能元器件的特长才真正开始。

6.5.3 远程作业系统的智能化趋向

1. 与人协调的智能

与自主机器人系统相比,远程作业系统的突出特点是机器人一边听从操纵者(人)的指示,一边进行作业,人和机器人之间以对话的形式交换信息。这种从智能层面支持人和

机器人对话的能力正是由智能接口实现的。现在涉及远程作业系统研究的一个内容是如何减轻人向机器人下达作业命令时的负担,有关这一点人们提出了各种方案。

不过,如果单从智能的观点回顾远程作业系统的进展的话,从20世纪90年代后半期以来实际上没有明显的成果。据说原因之一是网络技术的巨大冲击使有关智能的研究变得被冷落起来。

【智能远程作业系统的展开】 如果我们把远程作业系统的工具加以划分的话,有构建实际系统的硬件工具和增加使用便利性的软件工具,网络应该归于硬件工具的范畴。就远程作业系统的特点而言,为了连接空间彼此分离的站点,硬件固然重要,简化和便利向远程作业主体(机器人)传递工作的软件的贡献也不可小看。沿着这个方向发展的表现形式就是人与机器人的协调^[16]。人的智能作用实际上是多种多样的,在物竞天择中保存下来的各种能力中,或许有一种能力具有生物意义上的智能作用,那就是根据环境和对象状况领会问题的能力。其中也包含与他人协调和行动的能力。这是远程作业机器人系统今后应该追求的重要智能之一。为此,有关“协调”和“作业”的新的科学研究受到关注,它们是今后研究远程作业系统智能的重要课题。

2. 远程作业系统的普及

随着网络的高速、大容量的进程,网络已经深入到包括家庭在内的社会基本结构中。实际上,它就是一个我们活动环境中的远程作业系统,而且四通八达、无处不在。另外,要实现完全自主的机器人依然有不少困难。在这样的背景下,用户通过远程操作和智能控制指挥具有一定功能的机器人工具和设备的情况,也许将不再是遥远的事情。这就是所谓的远程作业系统的泛在化。也就是说,目前尽管远程作业技术在产业领域里只限于与机器人技术结合,但是将来会被应用到社会与生活领域中的各个方面。具体说来,如远程值守、远程看护、远程防范等。在这些应用中智能接口、远程作业命令方式、人和机器人对话形式等将发挥巨大的作用,推动远程作业系统的进步。

平井成兴 佐藤知正

参考文献

- 6.1 操縦型机器人系统的特征, 6.2 操縦型机器人的分类,
6.3 操縦型机器人的控制理论
- [1] 横小路, 吉川: マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.7 (1990) pp.818-825
 - [2] D. A. Lawrence: Stability and transparency in bilateral teleoperation, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5 (1993) pp.624-637
 - [3] 横小路: マスタ・スレーブ制御の理論, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6 (1993) pp.794-802
 - [4] 佐野, 藤本: マスタスレーブシステムの制御系設計の動向, システム/制御/情報, Vol.42, No.7 (1998) pp.356-362
 - [5] H. A. Ernst: MH-1, A Computer-Operated Mechanical Hand, Ph. D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (1961)
 - [6] 井上: 人工の手の計算機制御, 日本機械学会誌, Vol.73, No.618 (1970) pp.946-954
 - [7] F. P. Brooks et al.: Project GROPE — Haptic displays for scientific visualization, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'90), Vol.24, No.4 (1990) pp.177-185
 - [8] W. R. Ferrell and T. B. Sheridan: Supervisory control of remote manipulation, IEEE Spectrum, Vol.4, No.10 (1967) pp.81-88
 - [9] T. B. Sheridan: Telerobotics, Automatica, Vol.25, No.4 (1989) pp.487-507
 - [10] <http://www.centres.com/index.htm>
 - [11] R. C. Goertz and W. M. Thompson: Electrically controlled manipulator, Nucleonics, Vol.12, No.11 (1954) pp.46-47
 - [12] R. C. Goertz: Fundamentals of general-purpose remote manipulators, Nucleonics, Vol.10, No.11 (1952) pp.36-42
 - [13] R. C. Goertz and F. Bevilacqua: A force-reflecting positional servomechanism, Nucleonics, Vol.10, No.11 (1952) pp.43-45
 - [14] R. C. Goertz: Manipulator Systems Developed at ANL, Proc. the 12th Conference on Remote Systems Technology (1964) pp.117-136
 - [15] R. C. Goertz et al.: The ANL Model-3 Master-Slave Electric Manipulator — Its Design and Use in A Cave, Proc. the 9th Conference on Hot Laboratories and Equipment (1961) pp.121-142
 - [16] A. K. Bejczy and M. Handlykken: Generalization of Bilateral Force-Reflecting Control of Manipulators, Proc. 4th Ro. Man. Sy. (1981)
 - [17] M. S. Shimamoto: TeleOperator/telePresence System (TOPS) Concept Verification Model (CVM) Development, Proc. Pacific Congress on Marine Science and Technology, Honolulu, HI (1992) pp.97-104
 - [18] 平井, 佐藤: 言語介在型マスタスレーブマニピュレータ, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.1 (1984) pp.78-84
 - [19] 平井: Shared Autonomy の理論, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6 (1993) pp.788-793
 - [20] T. B. Sheridan: Space teleoperation through time delay: Review and prognosis, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5 (1993) pp.592-606
 - [21] M. V. Noyes and T. B. Sheridan: A Novel Predictor for Telemanipulation through a Time Delay, Proc. of the 20th Annual Conference on Manual Control (1984)
 - [22] W. S. Kim and A. K. Bejczy: Demonstration of a high-fidelity predictive/preview display technique for telerobotic servicing in space, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5 (1993) pp.698-702
 - [23] F. T. Buzan and T. B. Sheridan: A Model-Based Predictive Operator Aid for Telemanipulators with Time Delay, Proc. IEEE Int. Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Anaheim, CA (1989)
 - [24] 神徳, 谷江, 横井, 藤川: 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.6 (1992) pp.750-759
 - [25] W. S. Kim, B. Hannaford and A. K. Bejczy: Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.8, No.2 (1992) pp.176-185
 - [26] J. Funda, T. Lindsay and R. Paul: Teleprogramming: Towards delay-invariant remote manipulation, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.1, No.1 (1992) pp.29-44
 - [27] G. Hirzinger et al.: Sensor-based space robotics — ROTEX and its telerobotic features, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.5 (1993) pp.649-663
 - [28] 小田: ETS-VII のミッション, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8 (1999) pp.1055-1061
 - [29] 町田, 戸田, 三上, 駒田: センサ融合テレロボティクスによる宇宙における遠隔精密作業と遠隔センシング, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.8 (2000) pp.1184-1198
 - [30] K. Goldberg et al.: The Mercury project: A feasibility study for internet robots, IEEE Robotics and Automation Magazine (Special Issue on "Robots on the Web"), Vol.7, No.1 (2000) pp.35-40
 - [31] K. Goldberg (Ed.): The Robot in the Garden, The MIT Press (2000)
 - [32] J. R. Burnett: Force-reflecting servos add "Feel" to remote controls, Control Engineering, Vol.4, No.7 (1957) pp.1269-1274
 - [33] G. J. Raju: Operator Adjustable Impedance in Bilateral Remote Manipulation, Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (1988)
 - [34] J. Dudranguet et al.: A Generalized Bilateral Control Applied to Master-Slave Manipulators, Proc. 20th International Symposium on Industrial Robots (1989) pp.435-442

- [35] J. E. Colgate : Power and Impedance Scaling in Bilateral Manipulation, Proc. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1991) pp.2292-2297
 - [36] J. Doyle : Analysis of feedback systems with structured uncertainties, IEEE Proceedings, Vol. 129, Part D, No.6 (1982) pp.242-250
 - [37] 藤田：ロバスト制御性能と μ -シンセシス, システム/制御/情報, Vol.37, No.2 (1993) pp.93-101
 - [38] F. B. Llewellyn : Some fundamental properties of transmission systems, Proc. of the I. R. E., Vol.40, No.5 (1952) pp.271-283
 - [39] R. J. Adams and B. Hannaford : Stable haptic interaction with virtual environments, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.15, No.3 (1999) pp.465-474
 - [40] R. J. Anderson and M. W. Spong : Bilateral control of teleoperators with time delay, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.34, No.5 (1989) pp.494-501
 - [41] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine : Stable adaptive teleoperation, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.16, No.1 (1991) pp.152-162
 - [42] K. Kosuge et al. : Bilateral Feedback Control of Telemanipulators via Computer Network, Proc. IEEE/RSJ IROS'96 (1996) pp.1380-1385
 - [43] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine : Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet, Proc. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998) pp.1909-1915
 - [44] Y. Yokokohji, T. Imaida and T. Yoshikawa : Bilateral Teleoperation with Energy Balance Monitoring Under Time-Varying Communication Delay, Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2000) pp.2684-2689
 - [45] G. M. H. Leung et al. : Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.11, No.1 (1995) pp.105-116
 - [46] A. Sano et al. : Network-Based Force-Reflecting Teleoperation, Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2000) pp.3126-3131
 - [47] R. Oboe and P. Fiorini : A design and control environment for internet-based telerobotics, International Journal of Robotics Research, Vol. 17, No.4 (1998) pp.433-449
- 6.4 臨場感操縦型机器人系統**
- [1] 館暁, 小森谷清 : 第3世代ロボット, 計測と制御, Vol.21, No.12 (1982) pp.1140-1146
 - [2] S. Tachi and K. Yasuda : Evaluation experiments of a telexistence manipulation system, Presence, Vol.3, No.1 (1994) pp.35-44
 - [3] 館暁, 阿部稔 : テレグジスタンスの研究 第一報, 第21回計測自動制御学会予稿集 (1982) pp.167-168
 - [4] M. Minsky : Telepresence, Omni, Vol.2, No.9 (1980) pp.44-52
 - [5] J. D. Hightower et al. : Telepresence : A Hybrid Approach to High-Performance Robots, Proc. of '87 Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR) (1987) pp.563-573
 - [6] M. S. Shimamoto : TeleOperator/telePresence System (TOPS) Concept Verification Model (CVM) Development, N. K. Saxena, ed., Recent Advances in Marine Science and Technology, '92 (1992) pp.97-104
 - [7] E. Oyama et al. : Experimental study on remote manipulation using virtual reality, Presence, Vol. 2, No.2 (1993) pp.112-124
 - [8] S. Tachi : Augmented Telexistence, Mixed Reality (eds. Y. Ohta, H. Tamura), Chapter 14, Ohmsha (1999) pp.251-260
 - [9] 館暁ほか : HRP 遠隔操作プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.16-27
 - [10] 通産省編 : アールキューブ, 日刊工業新聞社 (1996)
 - [11] S. Tachi : Real-time remote robotics toward networked telexistence, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.18, No.6 (1998) pp.6-9
 - [12] 館暁監修 : バーチャルリアリティの基礎, 全4巻, 培風館 (2000)
 - [13] 梶本裕之ほか : 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会誌, Vol. J84-D-II, No.1 (2001) pp.120-128
- 6.5 智能远程作业系统**
- [1] W. R. Ferrell and T.B. Sheridan : Supervisory control of remote manipulation, IEEE Spectrum, (1967) pp.81-88
 - [2] D. J. Barber : MANTRAN : A Symbolic Language for Supervisory Control of an Intelligent Remote Manipulator, DSR 70283-3, MIT June (1967)
 - [3] D. E. Whitney : State Space Models of Remote Manipulation Tasks, Proc. 1st IJCAI (1969) pp. 459-507
 - [4] E. P. Kan : Supervised Robotics for Space Servicing, Proc. IROS'90 (1990) pp.437-443
 - [5] R. P. Paul, C. P. Sayers and M. R. Stein : The theory of teleprogramming, 日本ロボット学会誌, Vol.6 (1993) pp.782-787
 - [6] 平井成興・佐藤知正 : テレロボットにおけるワールドモデル管理のための操縦・動作の理解機能, 日本ロボット学会誌 Vol.7, No.6 (1989) pp.70-80
 - [7] 長谷川, 佐藤, 野原, 松井 : 人の直観的動作を利用するマイクロロボット群の遠隔操作システム, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4 (1996) pp.567-573
 - [8] 高橋 : 電子技術総合研究所における極限作業ロボットの研究開発成果, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5 (1991) pp.79-82
 - [9] 長谷川, 末広, 高瀬 : 環境モデルと作業スキルの統合によるロボット作業システム, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.6 (1989) pp.714-724
 - [10] 佐藤, 松井, 平井成興 : 人間との協同作業を特徴とする遠隔作業ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.5 (1991) pp.602-613
 - [11] 平井, 佐藤 : LARTS/Tを用いた言語主導型マスタスレーブマニピュレーション法, 日本ロボット学会誌, Vol.2, No.6 (1984) pp.526-535
 - [12] 脇田ほか : 知的モニタリングリングシステムとその

宇宙遠隔操作ロボットへの適用, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4 (1999) pp.540-548

- [13] K. Goldberg et al.: Desktop Teleoperation via the World Wide Web, Proc. ICAR 95, Nagoya, Japan (1995) pp.654-659
- [14] 館暉: パーチャリティとロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997) pp.32-35

- [15] 松丸隆文, 川端俊一, 神徳徹雄, 松日稔信人, 小森谷清, 谷江和雄, 高瀬国克: 通信回線を介したロボットの遠隔操作におけるタスク規範型データ伝送手法, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8 (1999) pp.62-73
- [16] 平井: Shared Autonomy の理論, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6 (1993) pp.788-793

第7章 人机界面

7.1 人机交互

7.1.1 交互方式的分类

随着机器人用途和机构的不同,人和机器人的交互形式也精彩纷呈。下面将对人与机器人交互的特性加以整理和概括。

首先可以根据时间特性,即是否必须具备通信的实时性,将人与机器人交互的形式分为同步型和非同步型;还可以根据空间特性,即人与机器人分处异地或同一场所,分为远程型和临场型;再进一步,根据主体特性,即人把机器人作为自己身体的一部分或分离的个体来操作,又可以分为一体型和对等型^[1]。

同步型人机界面有如临场感远程遥控操纵系统或基于自然语言的语音对话系统,是一种人和机器人通过视频、语音、控制信号进行实时通信的类型。至于非同步型的人机界面,是指机器人在接受任务之后,执行任务的时间不定,任何时间均可。一般来说,如果采用非同步型人机界面,那么对机器人本身自主性和可靠性的要求将会更高一些。

在核电站或宇宙空间等对人类来说很危险的一类场所中的作业机器人,它的人机界面是典型的远程型界面。分处两地的人们之间的交流手段,以机器人作为媒介的系统也属于这种类型。另一种类型是临场型界面,属于让机器人作为监护人或秘书等提供服务的类型。

远程型界面的研究课题有:如何构建人与机器人的共享环境,或者通过让机器人具有自主性,减少信息交换量,如何构筑使人更便捷地使用的系统。临场型人机界面的研究课题是在人与机器人共享的周围环境中,机器人如何识别环境并周到地提供服务。实际上,区别远程型和临场型,主要是靠人和机器人的物理距离来决定。例如,以机器人发出的语音能被人收听的距离,或者人能看到机

器人姿态或机器人周围环境的距离为衡量的界线。

在一体型人机界面中,机器人作为从侧,人作为主侧完成操纵任务。在对等型人机界面中,把机器人视为具有一定的智能,所以人与机器人的交互有点类似于人与人的交互。

基于以上3种分类关系,交互作用的特性可以在图7.1的空间坐标中进行表示。在图7.1中,离原点越近通信越密集,要求有更大的通信频宽和更高的通信频率。反之,离原点越远,对机器人的自主性和可靠性的要求越高,相应地人的负担将趋于减轻。

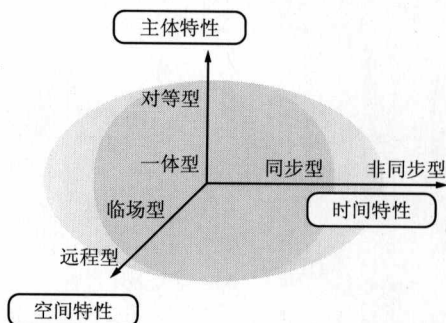


图 7.1 人机相互作用的特性空间

7.1.2 人机界面的具体例子

根据上述三种类型特性的不同组合,人机界面的构建方法也各异。基于各种相互作用方式构建的人机界面的具体例子如表 7.1 所示。

1. 一体/临场/同步型

在操纵起重机和铲车等场合,如果让机器人代替操纵者的手足来进行操作,就属于一体/临场/同步型类型的界面。再如,通过肌肉电位信号获得人的随意运动指令,像假手假足那样,能如同自己身体的一部分来操纵外骨骼型机器人的系统^[2,3];根据患者的能力进行步行训练,实施康复治疗的系统^[4]等。因此,与之相关的研究课题是如何理解人的

意图,以及如何提示自然的力觉及信息等。

表 7.1 人机交互类型的分类

空间特性	时间特性	主体特性	
		一体型	对等型
临场型	同步型	(1)外骨骼形机器人 助力型机器人	(4)工业机器人(示教) 服务机器人(交互型) 监护机器人 宠物机器人 泛在自主体
	非同步型		(5)工业机器人(示教-再现) 服务机器人(周期性) 搬运机器人
远程型	同步型	(2)远程服务机器人 远程医疗机器人	
	非同步型	(3)空间机器人	

2. 一体/远程/同步型

用于远程美术馆鉴赏^[5]、远程医疗^[6]等的远程操纵系统就属于一体/远程/同步型界面。相关的研究课题有远程操纵所依赖的主从操纵方式、临场感通信,以及与远程机器人周围的人交流的方式等。

3. 一体/远程/非同步型

一体/远程/非同步型与上面有类似之处,但是如果存在通信延迟(如行星探测机器人等)那么就可以将其归入这种类型。相关的研究课题包括考虑通信延迟的机器人指令方法、时间传送延迟后机器人动作状况的认知方法等。

4. 对等/临场/同步型

与人共存,面对面地进行交互的方式就属于对等/临场/同步型的界面。典型的例子,如服务机器人、监护机器人、宠物机器人等,至于泛在自主体(即一些嵌入环境的传感器和执行器群,它们能够无约束地支援人的活动)的界面,由于它的智能化整体环境可以视同为机器人,故也应该将其归于这一类型。相关的研究课题有非约束人的行动、意图认识、信息提示方式等。

5. 对等/临场/非同步型

如搬运机器人搬运物品,扫除机器人进行清洁等,机器人为了执行人委托的任务需

要花费相当长的一段时间,执行类似任务时的交互就属于对等/临场/非同步型。相关的研究课题有任务的委托方法、任务实施状况的提示方法等。

7.1.3 界面的构筑方法

目前,计算机本身的功能(输入输出设备、计算能力、通信手段等)相对已经比较固定,因此允许在一个共通的平台对计算机界面加以研究,所以系统逐渐趋于方便和成熟。但是,机器人不同,在移动或物体操纵方面它本身就面临许多课题,目前人们在特殊硬件设计、系统方便性的深化研究等方面尚未注入很多的力量。

机器人界面的构筑方法基本上和计算机一样,只是应用开发硬件的设计有些不同。图 7.2 给出了以人为本的界面设计方法:首先应该了解人的模型,再考虑合适的传感技术和信息提示技术完成应用设计,等系统完成后进行用户可用性评价,再把结果反馈上来改进系统。

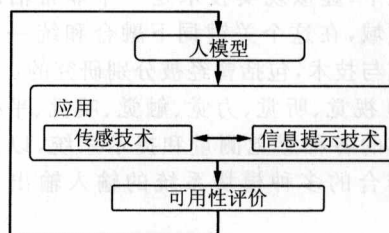


图 7.2 以人为本的界面设计法

具体说来,在人模型中有人体模型、感觉模型、认知模型、情感模型等各种层次^[7]。例如,设计外骨骼型机器人时,不但要借鉴人体模型,即关节构造,开发高效率的助力机构,而且必须考虑不给关节增加负担^[2,8]。如设计宠物机器人或服务机器人时,要参考人的情感和动作来进行系统设计^[9]。

在应用开发设计阶段,应该参考人的模型,考虑人的操纵性。比如,开发远程操纵机器人时应该考虑的相关研究课题有:如何由传感器感知机器人周围的状况,如何通过 VR 提供临场感的信息;在开发服务机器人时的课题有如何利用语音对话、手势、表情等各种形式使系统的应用更便捷等。

7.2 虚拟现实与机器人

虚拟现实(VR)技术就是人类沉浸在由计算机创造的模拟世界中,通过交互感受模拟体验,或者让机器人充当自己的一部分提供逼真的临场感与远程实际世界之间进行交互,它正在成为机器人系统中人机界面的重要技术。近年来,设备技术和计算机技术的飞速发展,使SF世界的梦想正在迅速地变成现实。

7.2.1 虚拟现实技术的动向

20世纪60年代,VR的理念问世,但当时尚不具备实现的技术,因此该理念仅仅停留在计算机控制的立体显示的简单试验样机水平。进入80年代后,随着实现这种理念的技术的成熟,采用立体头盔显示器(HMD)和广视野显示器的、有沉浸感的视觉提示系统及其应用研究开始盛行^[1]。到了90年代,提示力觉、触觉的触觉界面研究及应用也活跃了起来。

眼下,虚拟现实技术是一个非常活跃的研究领域,在这个关键词下融合和统一了诸多研究与技术,包括曾经被分别研究的:

① 视觉、听觉、力觉、触觉、嗅觉、平衡感等人体的各种感觉测量和提示系统,以及它们结合的多种模块系统的输入输出界面技术;

② 临场感的远程操纵系统,以及异地人员之间的交流系统等远程控制和空间共享领域研究;

③ 计算机图像(CG)等虚拟世界的逼真表现和真实世界仿真等仿真建模领域的研究;

④ VR沉浸等属于人类感觉特性的解释和感性知觉心理与艺术领域的研究等。

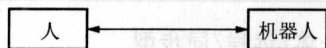
鉴于潜在的实用性,近几年来,虚拟现实技术在现实世界的应用研究备受关注,例如,扩展现实感(augmented reality)技术,它借助于透明HMD,将虚拟世界的信息重合并投影到对应的真实世界中,开展信息识别和信息提示。还可以举出着眼于虚拟世界和真实世界无缝融合的复合现实感(mixed reality)技术,它把实际拍摄的图像放到CG中提高真实感。此外,导入通信网络技术的可穿戴系统、远程控制系统、空间共享系统等研究也相

当盛行。

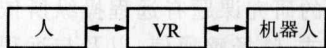
7.2.2 VR模型介入型远程操纵系统

基于VR技术的机器人人机界面是VR模型介入型远程操纵系统的典型例子。远程操纵系统是人-机系统的代表,构成了包括操纵者本身和对环境操作的机器人的大控制环。由于通信线路也处于这个控制环中,通信时间延迟和通信容量的限制会造成系统控制特性、稳定性和操纵性的下降。

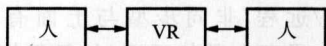
在早期开发的抓取危险物的远程操纵系统中,传统的做法是让操纵者和机器人处于同一场所,操纵者或借助于直接观察来操纵机器人,或借助于监视器画面来进行操纵(图7.3(a))。随着通信技术的发展,人们产生了利用机器人来完成对更遥远地方操纵的愿望,于是通信线路可能引发的问题开始被人们所关注。



(a) 与机器人直接交互作用



(b) VR系统介入的人-机器人交互作用



(c) VR系统介入的人与人交互作用

图7.3 VR介入的人机界面形态

例如,从地面上操纵空间机器人时,由于通信时间延迟无法避免,也就引起了操纵结果传递的延迟,从而使操纵者感到不便。此外,由于地面操纵系统和空间机器人构成的控制环中存在通信时间的延迟,机器人手臂控制系统的稳定性会变恶化,在接触物体时可能会发生意料之外的振动^[2]。此时,试图根据时间延迟因素调低反馈增益来保证稳定性的做法并不可取,因为那样做可能会造成接触时的触觉不确定等后果。

另外,通信线路在单位时间内允许传递的信息量(通信容量)也受到一定限制。这样一来,传送大信息量的录像画面信号,图像的分辨率就会下降,如果不想降低分辨率,就不得不降低图像的更新周期,以减少信息量。

不过此时人们又会面临一个新的问题,即信息量的降低将会引起图像画面质量变差,增加作业环境识别方面的困难。

为了解决通信路线的相关问题,有人提出向远程操纵系统导入VR技术,即借助于VR模型建立一个远程操纵系统,其特点是在人和机器人之间引入在计算机上创建的VR模型(图7.1(b))。

在空间机器人等这类无法避免通信时间延迟的远程操纵系统中,最初采用的作业示教方法是通过CG技术的机器人模拟器来达到预测显示的目的。但这是一个没有力觉反馈,只有图像信息的单向操纵系统,操纵感不强,如果操纵作业伴有接触,那么其操纵性能也不会很好。因此,人们提出一种改进的远程操纵系统^[3],它不仅将VR模型布置在操纵者一侧,借助于视觉CG显示,还附加仿真作业示教时发生的环境约束力功能,图7.4是在这个系统上开展的与VR模型空间的力交互验证实验和时间延迟远程操纵系统的适应验证实验^[4]。

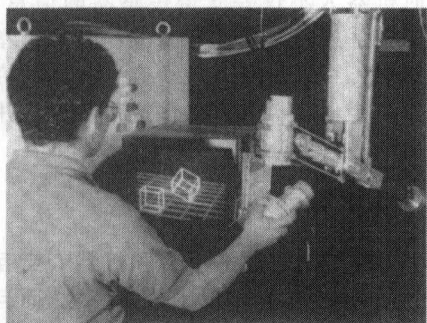


图7.4 操纵VR模型的力觉提示系统

这样一来,由于在操纵者一侧事先准备了远程作业环境建模的VR模型,操纵者不必直接去面对从实际作业环境传来的延迟操纵结果,改为与VR模型进行交互就行了,从而得到没有时间延迟的高逼真度的操纵结果,避免了通信路线可能造成的问题。

另外,灵活运用VR模型,提供作业支援信息,可以简化远程操纵机器人作业环境的识别工作,提高操纵性能。

例如,零件之间接触点附近的信息对装配作业十分重要。由于VR模型的CG能提供任意视角的作业环境图像,因此能使原来无法安装摄像机或是被零件的影子遮挡而无

法观察到的作业成为可能。同样的系统还能将机器人手部坐标的坐标轴与手部重合起来进行显示,简化了位置重合作业。众所周知,在机器人作业中识别手臂构件与障碍物的碰撞是相当困难的事情,有人建议在手臂前端利用虚拟雷达^[5]建立一个虚拟非冲突区,利用作业信息提示来避免碰撞。

在VR模型介入型远程操纵系统投入使用前,还有不少课题有待研究,如构筑现实世界作业环境时所需要的VR模型的实时建模和标定技术、逼真VR模型的仿真技术、高性能输入/输出界面机器的开发等。

7.2.3 空间共享系统

现在,VR技术也被用于异地人与人之间通信的系统中(图7.3(c))。此时的应用目标是让互相远离的用户通过VR技术既意识到对方的存在,又实现逼真的临场感通信。目前,已经开发出所谓的超镜(hyper mirror)系统,分处异地的参与人员能出现在相同的背景图像上,共享同一图像。虽然目前这个系统还比较简易,但是分处异地的参与人员已经能够对照镜子宛如身处一室那样沟通对话了,所以这样的临场感还算逼真^[6]。

人们还建立了一种空间共享实验系统。系统以共享三维空间为目标,导入一个沉浸式显示屏(由环绕用户的大型显示和立体显示组成)能在每一位参与人员实际映像的基础上建立参与者VR模型的视频形象^[7]。参与人员能共同观察立体显示的虚拟物体,识别彼此的动作和身体移动的空间信息,达到如同与对方共处一室的效果来进行交流。

再举出机器人远程控制VR技术导入的例子。通过所谓的远程存在^[8]和遥现的逼真临场感,操纵者能够感觉如同搭乘在机器人上一样,结果即使是人与机器人身处遥远的异地,却能借助于这种交流手段灵活地加以控制。在此基础上,有人提出一种用实时远程控制机器人技术(R³)构建人类能力扩展系统的理念^[9],即把这种技术和通信网络技术结合起来,与作为媒介的机器人之间不断进行切换,其结果就能超越空间的制约,实现瞬时移动。

为了通过上述VR系统的媒介构建人-机器人之间的通信系统,在高性能输入输出界

面设备的研发方面还有多个课题有待解决,如通信时间延迟短、大容量通信网络的普及、高分辨沉浸式显示器以及与人共存型机器人(如与人类生活环境共存和活动的拟人机器人)等。

神德彻雄

7.3 多模态界面

除语言(语音信号)以外,人们在交流中还使用包括手势(非语言信号)在内的多种信号表达形式。解读人类发出的多种信号,顺畅地实现人-机器人之间交流的技术就是多模态界面。所谓多模态界面是指语音、图像等多个输入模态(modal)组合成的用户界面。例如,用图像处理来判断机器前面是否有人,用是否有人来启动语音识别,用图像防止无人时因噪声识别失误引起的机械误动作等。

在机器人上实现多模态界面应用,比在计算机上更为重要。因为与计算机不同,机器人是活动体,活动的范围遍及人类生活的现实世界,而非计算机中的虚拟世界。所谓现实世界中的活动意味着在其间活动的人和变化的环境都属于信息处理的对象。总之,形形色色的非语言信息围绕在机器人的周围。除了语言信息,还要使用非语言信息的意义就在于多模态界面在实现人类与机器人相互作用方面是一项非常重要的技术,本节的内容着重从多模态界面的角度来研究机器人技术。

大部分多模态界面都是以计算机用户界面的形式开发的。其中很多都将图像识别和语音识别结合起来使用。例如,用摄像机识别别人手势的系统^[1,5,7]。我们以人类向导的系统为例子^[7]加以说明。有的向导系统可以识别别人的手臂或指尖,而人可以通过手操作计算机图像。有的向导系统能通过手臂动作和语音向计算机下达指示^[4]。也有的使用触摸屏的系统^[8,13]。这个系统可以点击显示地图图像的触摸屏,把指示语“想去这里”作为信号输入^[8]。另外还有的系统使用鞋垫型传感器来判断前方是否有人,然后启动语音识别系统^[15]。

把多模态界面安装在机器人上的应用研究很多。例如,小林等正在研究的ROBITA机器人能够借助于图像识别、语音识别、语音

处理与机器人或多人进行对话^[12]。通过图像辨识他人脸部的朝向,可以判断谁在跟机器人讲话。通过语音处理也可以确定发话人的方向。这种辨认机器人对话者的技术在多用户环境的语音识别中很有用。

构筑多模态界面的难题在于如何从多个传感器所采集的混合信号中提取有用的成分。除了各个传感器信号的识别以外,确定它们之间的时序关系和各信号之间的相关性对决定系统的工作至关重要。有一项研究是探讨如何通过考察语音信号和图像信号的相关关系,从图像中发现发话者^[3]。其原理就是设法捕捉说话者脸部、嘴部动作与语音信号的同步特征。还有一项正在开展的研究,是探讨如何根据语音信号和图像信号让机器人辨别发话者的位置^[6]。

开发机器人的多模态界面,仅靠简单地增加传感器装置是不够的。即使机器人能够借助于多个传感器获取多种信息,如果与之交流的人未能注意到机器人所关注的信息,那么再多的信息也是徒劳的。也就是说,在交流时机器人不仅要获得传感器的信息,还要借助于手势向人表达它在关注什么。基于这个观点正在开展着几项研究^[2,10,11],研究者认为这是今后机器人开展多模态界面应用研究方面的一些十分重要的课题。

7.4 手势界面

下面详细地讲述一下人和机器人交互的手势界面。显然,它不但十分有特色,而且在人和机器人共享的现实世界上发挥着重要的作用^[16,17]。随着计算机速度加快和手势识别技术^[28,29]的发展,自1960年以来手势研究课题一直挺热门。研究表明,手势是自然交流中的一个重要因素,它使人机交流的内容更加丰富以至于成为一种不可或缺的手段。

Ekman^[6]把手势在交流中的功能分为以下5种类型:第一种,具有社会意义的“象征”(emblem)作用,如V和OK手势;第二种,“示例”作用,即强调欲表达内容或指示对象物(illustrator);第三种,“情感表达”(affect display)作用;第四种,听说双方的置换或会话顺畅交流的“调节器”(regulator)作用;第五种,对状况进行下意识调节的“适应器”(adaptor)作用。手势界面就是基本按照这5种功能的

分类进行设计的^[18]。

从手势功能的角度看,人类向导系统(illustrator)^[7]和MIT媒体研究所开发的“把它放到哪儿(put that there)”系统^[1]都属于指示对象物(“示例”),引起关注的作用。

手势界面的应用还可以举出手语界面的例子。手语与线状特性的语音语言存在差别,它是一种通过在三维空间调动多个器官而形成的语言(“象征”),属于空间语言^[20,21]。正因为如此,有必要采用与一般的手势界面不同的处理和表达方法。它的输入方式可以选择穿戴型方式和非穿戴型方式^[19],根据不同的利用形态和状况,输出有基于CG技术的动画^[22,23]或实际图像方式。

在手势界面的支撑技术中,首先可以举出手势的识别技术,它分为穿戴型方式和非穿戴型方式。前者如DataGlove^[30]那样的手套型和磁感应式、光学式的运动捕捉器等方式。该方式的数据输入精度高,易于计算机处理,但因为约束了用户的身体,不大容易成为一种自然界面。后者通过摄像机的图像来识别手势。不过,仅从图像来识别手势相当困难,故可以改用计算机视觉再借助于模型等来推测的方法^[29]。为了更加正确地识别距离和动作,甚至可以采用立体图像(双目立体视觉法)。非穿戴型方式的优点在于不会对用户的身体造成约束。

表达手势的技术有两种,即图像表达和机械(主要靠机器人)表达。在本节中,我们着重介绍在拟人机器人的人机交互中所采用的手势界面。

武田^[24]曾经借助于语音和手势构建了一个人与机器人的协调作业系统。在该系统中,人能够利用手势向机器人发出指示。

与上述研究有所不同,在另一个关于手势界面的研究中,采用了诱导(entrainment)手势界面实现人与机器人的交互作用。渡边^[25]注意到对话双方往往一边交流,彼此还一边加入语音、肢体动作、表情等因素,他希望利用这个现象达到自然交流的目标。渡边认为今后有关研究的主要课题是如何阐明交互作用形成的基本原理,即建立交互作用关系的机制。

小野^[24,27]注意到交流中手势和信息传递的关系,提出对话模型的交流方式。具体说

来,在对拟人机器人向导手势的研究中,他通过实验考察了人与机器人身体同步动作关系的构建方法和信息传递的机制。实验结果表明,当人随着机器人手势的诱导做同步动作时,信息的传递会很顺畅。

上面围绕手势的功能,简明地叙述了手势界面的研究实例和相关的支撑技术。可以预见,今后,在人和机器人的交流方面,手势界面将会变得越来越重要。

今井伦太 小野哲雄

7.5 泛在自主体界面

7.5.1 泛在自主体

1991年,Xerox PARC的Mark Weiser提出了在21世纪办公室营造新的信息环境的概念,这就是泛在计算(ubiquitous computing)的概念^[1]。这个概念的含义既指随处均有计算机这一层意思,或者说要让众多的计算机遍布于现实世界之中,用户无需过分在意它们的存在,却能随意自如地去利用它们,从而提高计算机的利用价值。

泛在自主体比泛在计算更进了一步,在它的概念中引进了针对人和环境的变化能动的机器人,结果是,这些泛在自主体能以非约束的方式向实际世界中活动的用户提供支持。有了泛在自主体,不仅能够能动地检测人类的活动,还能通过实际世界现有的物体支持人类活动,甚至向实际世界中自由活动的人提供能动的和活动的支持。

泛在自主体界面包括:①无所约束地识别人的活动;②积累所获得的活动履历;③能动地支持人的活动。下面分别予以说明。

7.5.2 人的活动识别

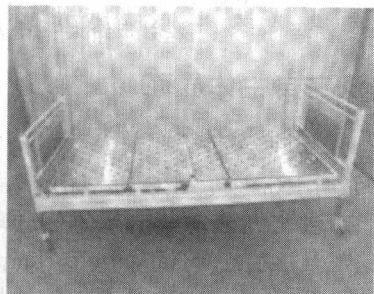
掌握在环境中自由活动的用户的状况有两种方法:一种是直接观测人体自身的位置和姿势;另一种是借助于遍布在环境中的物体和机器的状态间接地观测操作它们的人的活动。

直接观测人体自身的状况可以借助于视觉、激光扫描仪、磁传感器、压力传感器和话筒等来进行观测。

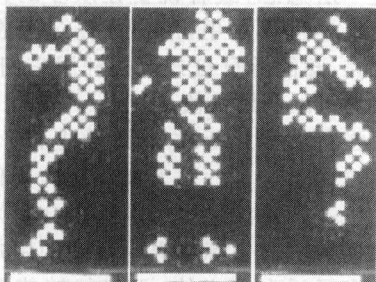
视觉的方法是指在不同场所设置若干个单目摄像头,从多个摄像头信息来了解人的三维空间位置^[2,3]。即便设备能够获得立体视觉等三维空间位置信息,那么也需要在不

同场所设置多个这样的设备,以便消除死角,更确切地掌握人的行动状况^[4]。

如果使用压力传感器,那么可以把它们铺设在地板、桌子、椅子、床等位置,直接测量人的体压。例如,铺设在床上的压力传感器能检测人的睡姿^[6](图 7.5)。利用人体的静电容量变化,可以非接触地获得手臂,甚至指尖在桌面上的位置^[6](图 7.6)等。

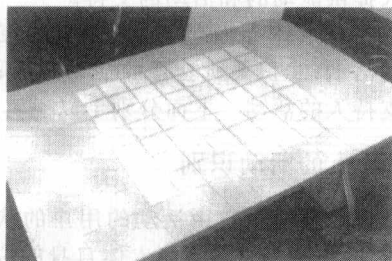


(a) 铺设压力传感器的(传感器)床

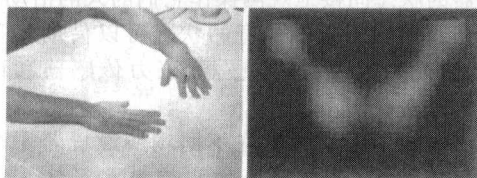


(b) 识别人的睡姿

图 7.5 压力传感器获得睡姿的例子(产总研)



(a) 铺设在桌面上的导线(使用时封盖)



(b) 桌面上的手和它的电位图

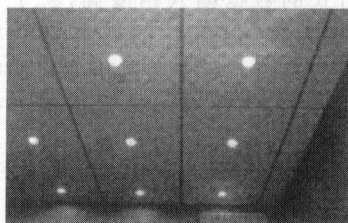
图 7.6 利用人体电容获取指尖位置的例子

使用话筒的方法是把多个话筒排成阵列确定发话人声源的空间位置^[7]。

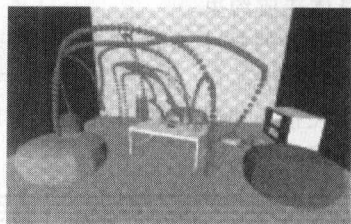
使用数据服装也可以掌握人的位置和姿势,以及他与环境的接触情况^[8]。乍看上去,人们都会认为穿上数据服装有点受拘束,实际上如果将传感器埋入服装纤维中,那么在使用中人们一般是不会在意到它们的存在的^[9]。

检测物体和机器状况可以通过以下途径:①与上述检测人的位置和姿势类似,非约束性地检测物体的特征;②从计算机和其他信息设备(家电)的使用状况直接获取;③将传感器附设到已有的物体上。

至于附加传感器的具体办法,又进一步可以举出利用微型开关和磁性开关获取门、抽屉等的开闭状况^[10]的例子,在天花板上配置阵列状超声波接收机,在物体上安装发射机获得物体空间位置的例子^[11,12](图 7.7)等。



(a) 布置在天花板上的超声波接收机阵列



(b) 捕获到的物体位置信息

图 7.7 利用超声波传感器来获得物体位置

为了收集上述传感器的信息,通常需靠无线 LAN、RF-ID(非接触式数据读写)^[10]、持有信息处理能力的智能数据载体等^[13]。

7.5.3 人的活动履历的积累

如果能够将人的行动体验记录下来并供日后检索的话,那么就为实施下述事例打下了基础^[14]:①向人提示已往的经验,帮助做出判断;②按照行动履历记录的习惯,向本人提供适宜的物理支持服务;③有关人的行动的

数据库和模型有利于人类科学的研究。

例如,在家庭各个房间内配置传感器统计和处理人的行动履历,可以积累主人在一天内,乃至一年内的行动模式^[14](图7.8)。如果再把家庭内摆设的机器和物体与人之间的交互作用状况记录在案,那么就能积累更详细的活动状况,甚至活动意图。

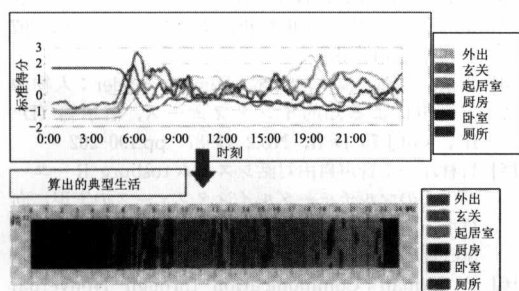


图7.8 人的活动履历的累积

7.5.4 人活动的能动性支持

在通过机器人或执行器向人提供能动性的支援服务研究方面,如何解决人们的压抑感是研究的重点课题。为此需要留心解决以下几个问题:①人的活动履历(前后关系)的时序性;②传感器信息的不确定性;③人的关注兴奋点的不确定性。

排除各种各样的不确定性的措施是让人与机器人交互作用的设备在配置时略有冗余,并使它们互为补充^[15](图7.9)。为了避免给人带来压抑感,还可以改用在机构上柔软的、透明机械手^[14](图7.10),或者人们喜爱的宠物机器人等。

中内 靖

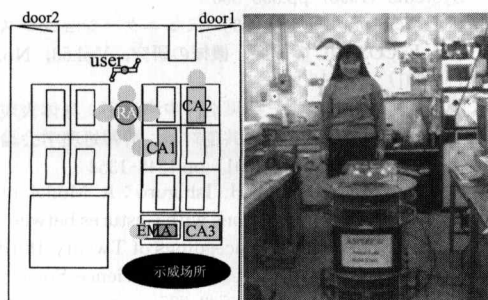


图7.9 利用冗余配备的接口和移动机器人实现向导的例子



图7.10 减轻压制感的透明机械手的例子(东京大学)

参考文献

7.1 人机交互

- [1] 中内, 安西: ヒューマン・群知能ロボット・インタフェースシステム—人間とロボットの協調について—, 計測と制御, Vol.31, No.11 (1992) pp.1167-1172
- [2] K. Kiguchi et al.: An interface between an exoskeletal elbow motion assistance robot and the human upper arm, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.5 (2002) pp.439-452
- [3] S. Lee and Y. Sankai: Power Assist Control for Walking Aid with HAL-3 Based on EMG and Impedance Adjustment around Knee Joint, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2002) pp.1499-1504
- [4] 藤江: 歩行支援ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5 (1996) pp.628-631
- [5] 前山, 油田, 原田: 移動ロボットの遠隔操作による美術館鑑賞—感性特プロにおけるロボットの役割—, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4 (1999) pp.486-489
- [6] 中村: 低浸襲外科手術用ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1 (2000) pp.41-44
- [7] P.H. リンゼイ, D.A. ノーマン: 情報処理心理学入門, サイエンス社 (1983)
- [8] 小林: ウェアラブルロボットの福祉機器への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.8 (2002) pp.805-808
- [9] 柴田: 人とロボットの身体的インタラクションを通じた主観的価値の創造—アザラシ型メンタルコミットロボットの研究開発—, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.200-203

7.2 虚拟现实与机器人

- [1] 服部桂: 人工現実感の世界, 工業調査会 (1991)
- [2] Tomas B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, MIT Press

- (1992)
- [3] 神徳, 谷江, 横井, 藤川: 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.6 (1992) pp.750-759
 - [4] 神徳, 谷江: 仮想環境のための干渉力発生アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.3 (1993) pp.347-355
 - [5] 妻木, 高橋, 尹, 内山: パーチャルレーダによる障害物情報提示システム, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4 (2001) pp.492-498
 - [6] 森川, 山下, 佐藤, 福井: 相手の空間の指差しが可能がビデオ対話: 超鏡, 計測自動制御学会第50回パターナ計測部会研究会 (2000), pp.382-387
 - [7] 廣瀬, 小木, 玉川, 山田: 没入型コミュニケーションのための高臨場感ビデオアバタ, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.2, No.2 (2000) pp.161-168
 - [8] 館岡: パーチャルリアリティとロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997) pp.512-515
 - [9] 通産省アールキューブ研究会: アールキューブ, 日刊工業新聞社 (1996)
- 7.3 多模态界面, 7.4 手勢界面**
- [1] R.A. Bolt: Put-that-there: Voice and gesture at the graphic interface, Computer Graphics, Association for Computer Machinery, inc, Vol.14, No.3 (1980) pp.262-270
 - [2] C. Breazeal and B. Scasselati: A Context Dependent Attention System for a Social Robot, IJCAI-99 (1999) pp.1146-1151
 - [3] I. Fermin, H. Ishiguro, H. Okuno and H. Kitano: A Framework for Integrating Sensory Information in a Humanoid, Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (2000) pp.1748-1753
 - [4] M. Fukumoto, Y. Suenaga and K. Mase: Finger pointer: Pointing interface by image processing, Comput. & Graphics, Vol.18, No.5 (1994) pp.633-642
 - [5] P. Maes, T. Darrell, B. Blumberg and A. Pentland: The alive system: Wireless, Full-Body Interaction with Autonomous Agents, Perceptual Computing Technical Report 257, Mit Media Lab. (1995)
 - [6] K. Nakadai, K. Hidai, H. Mizoguchi, H.G. Okuno and H. Kitano: Real-Time Auditory and Visual Multiple-Object Tracking for Humanoids, IJCAI-2001 (2001) pp.1425-1431
 - [7] Y. Suenaga, K. Mase, M. Fukumoto and Y. Watanabe: Human reader: An advanced man-machine interface based on human images and speech, Trans. IEICE, J 75-D-II (1987) pp.190-202
 - [8] 伊藤, 伝田, 中川: マルチモーダルインタフェースと協調的応答を備えた観光案内対話システムの評価, インタラクション'97 (1997) pp.135-142
 - [9] 今井, 開, 安西: 注意機構を利用したヒューマンロボットインタフェース, 信学論 (D-II), Vol.J 77-D-II (1994) pp.1447-1456
 - [10] 今井倫太, 小野哲雄, 石黒浩: 身体表現を用いたロボットの発話生成, AI チャレンジ研究会 (第13回) (2001) pp.9-16
 - [11] 小嶋秀樹: ロボットの社会的発達と「心の理論」の獲得, 知能と複雑系 (2000-ICS-122) (2000) pp.13-18
 - [12] 松坂要佐, 小林哲則: Robita: Group Conversation Robot, AI チャレンジ研究会 (第13回) (2001) pp.1-8
 - [13] 水梨, K.R. キム, 森元: 音声とポインティング・ジェスチャの統合意味解析, インタラクション'97 (1997) pp.41-42
 - [14] 末永, 間瀬, 福本, 渡部: Human reader: 人物像と音声による知的インタフェース, 信学論 (D-II), Vol.J 75-D-II, No.2 (1987) pp.190-202
 - [15] 竹林洋一: 音声自由対話システム tosburg ii—ユーザ中心のマルチモーダルインタフェースの実現に向けて—, 信学論 (D-II), Vol.J 77-D-II, No.8 (1994) pp.1417-1428
 - [16] P. Ekman: Communication through Nonverbal Behavior, Affect, Cognition and Personality, Springer (1965)
 - [17] R.L. Birdwhistell: Kinesics and Context, University of Pennsylvania Press (1970)
 - [18] 黒川隆夫: ノンバーバルインタフェース, オーム社 (1994)
 - [19] D.J. Sturman and D. Zeltzer: A Survey of glove-based input, IEEE Computational Graphics and Applications, Vol.14, No.1 (1994) pp.30-39
 - [20] L.A. Friedman: On the Other Hand, Academic Press (1977)
 - [21] 神田和幸: 手話学講義, 福村出版 (1994)
 - [22] 長嶋, 亀井, 杉山: 形態素駆動型手話アニメーションシステム, 信学技法, Vol.ET 96-86 (1996) pp.73-78
 - [23] 崎山, 大平, 佐川, 大木, 池田: リアルタイム手話アニメーションの合成, 信学論 (D-II), Vol.J 79-DII, No.2 (1996) pp.182-190
 - [24] H. Takeda, K. Iwata, M. Takaai, A. Sawada and T. Nishida: An Ontology-Based Cooperative Environment for Real-World Agents, Proceedings of Second International Conference on Multiagent Systems (1996) pp.353-360
 - [25] 渡辺富夫: 心が通う身体的コミュニケーションシステム E-COSMIC の開発, 機械の研究, Vol.53, No.1 (2001) pp.9-16
 - [26] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平: 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6 (2001) pp.1348-1358
 - [27] T. Ono, M. Imai and H. Ishiguro: A Model of Embodied Communications with Gestures between Humans and Robots, Proceedings of Twenty-third Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci 2001) (2001) pp.732-737
 - [28] V.I. Pavlovic, R. Sharma and T.S. Huang: Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.19, No.7 (1997) pp.677-695

- [29] 岩井儀雄：モデルベース手法による身体動作計測，情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会，Vol.2001，No.66 (2001) pp.73-80
- [30] T. Zimmerman, J. Lanier, C. Blanchard and S. Bryson : A Hand Gesture Interface Device, Proc. CHI'87 (1987) pp.189-192
- 7.5 泛在自主性界面**
- [1] M. Weiser : The Computer for the 21 st Century, Scientific American (1991.9) pp.94-104 (邦訳：21世紀のコンピュータ，日経サイエンス (1991.11) pp.60-70)
- [2] 十河，木本，石黒，石田：分散視覚システムによる移動ロボットの誘導，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.7 (1999) pp.1009-1016
- [3] J. Lee and H. Hashimoto : Intelligent Space—Its Concept and Contents—, Proc. of IEEE/RSJ IROS 2002 (2002) pp.1358-1363
- [4] B. Brumitt et al. : EasyLiving : Technologies for Intelligent Environments, Proc. of the International Conference on Handheld and Ubiquitous Computing (2000) pp.12-29
- [5] 西田，末廣，平井：呼吸波形分析による血中酸素飽和度降下推定，第20回バイオメカニズム学会講演会予稿集 (1999) pp.1260-1266
- [6] 暦本：SmartSkin：複数の手の位置と形状を認識するセンサーとその応用，情報処理学会インタラクシオン2002 予稿集 (2002) pp.133-140
- [7] K. Nakadai et al. : Real-time auditory and visual multiple-speaker tracking for human—robot interaction, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.5 (2002) pp.479-489
- [8] 川村：ソフトメカニカルスーツの研究概念，日本ロボット学会誌，Vol.17，No.6 (1999) pp.799-802
- [9] 稲葉，星野，井上：導電性ノアブリックを用いた全身被覆型触覚センサスーツ，日本ロボット学会誌，Vol.16，No.1 (1998) pp.80-86
- [10] Y. Nakauchi et al. : Vivid Room : Human Intention Detection and Activity Support System for Ubiquitous Autonomy, Proc. of IEEE/RSJ IROS 2003 (2003) pp.773-778
- [11] M. Addlesee et al. : Implementing a sentient computing system, IEEE Computer Magazine, Vol. 34, No.8 (2001) pp.50-56
- [12] 西田，相澤，堀，柿倉：超音波センサを用いた人の日常活動の検出，計測自動制御学会第2回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI 2001) 予稿集 (2001) pp.7-8
- [13] D. Kurabayashi et al. : Information Assistance in Rescue using Intelligent Data Carriers, Proc. of IEEE/RSJ IROS 2001 (2001) pp.2294-2299
- [14] 佐藤：生活を支えるネットワーク知能機械—ロボティックルームの試み，東芝レビュー，Vol.56，No. 9 (2001) pp.28-32
- [15] 岩倉，白石，中内，安西：ユーザの行動の不確実性に対応した実世界指向分散ヒューマンインタフェースシステムの提案，情報処理学会論文誌，Vol.39，No.5 (1998) pp.1502-1513

電源	5V	1
電源	5V	2
電源	5V	3
電源	5V	4
電源	5V	5
電源	5V	6
電源	5V	7
電源	5V	8
電源	5V	9
電源	5V	10
電源	5V	11
電源	5V	12
電源	5V	13
電源	5V	14
電源	5V	15
電源	5V	16
電源	5V	17
電源	5V	18
電源	5V	19
電源	5V	20
電源	5V	21
電源	5V	22
電源	5V	23
電源	5V	24
電源	5V	25
電源	5V	26
電源	5V	27
電源	5V	28
電源	5V	29
電源	5V	30
電源	5V	31
電源	5V	32
電源	5V	33
電源	5V	34
電源	5V	35
電源	5V	36
電源	5V	37
電源	5V	38
電源	5V	39
電源	5V	40
電源	5V	41
電源	5V	42
電源	5V	43
電源	5V	44
電源	5V	45
電源	5V	46
電源	5V	47
電源	5V	48
電源	5V	49
電源	5V	50
電源	5V	51
電源	5V	52
電源	5V	53
電源	5V	54
電源	5V	55
電源	5V	56
電源	5V	57
電源	5V	58
電源	5V	59
電源	5V	60
電源	5V	61
電源	5V	62
電源	5V	63
電源	5V	64
電源	5V	65
電源	5V	66
電源	5V	67
電源	5V	68
電源	5V	69
電源	5V	70
電源	5V	71
電源	5V	72
電源	5V	73
電源	5V	74
電源	5V	75
電源	5V	76
電源	5V	77
電源	5V	78
電源	5V	79
電源	5V	80
電源	5V	81
電源	5V	82
電源	5V	83
電源	5V	84
電源	5V	85
電源	5V	86
電源	5V	87
電源	5V	88
電源	5V	89
電源	5V	90
電源	5V	91
電源	5V	92
電源	5V	93
電源	5V	94
電源	5V	95
電源	5V	96
電源	5V	97
電源	5V	98
電源	5V	99
電源	5V	100

第 8 章 机器人与通信系统

互联网的普及带动了各个领域的 IT 进程,制造业也不例外。比如,远程维护服务的机器人信息网络传送、现场人员配备便携式 PC 机的远程作业支持等新技术的尝试都在开展之中。人们期待这些技术能为相距遥远的两地之间提供快速信息共享,以便提高生产效率。其中的一个关键技术涉及以网络为中心的通信技术。

本章将对网络技术做一些介绍。迄今为止,通信接口和通信方式在制造业中起到重要的作用,显然它也是今后生产设备更新换代的关键技术之一。

8.1 通信接口

1. RS-232C

RS-232C 是美国电子工业协会(EIA)制订的串行通信的标准之一。串行通信已经十分普及,成为绝大多数 PC 机的标准配置,并被用于与 MODEM 等周边设备进行连接。在机器人控制方面它被用来连接传感器、报警器等。它的通信形式为非对称式,适用于传送速度小于 20Kbit/s、15m 距离内的数据传送。

按规定它应该是 25 针接插件(部分针脚未定义)。因为很少用到全部针脚,所以又有 9 针等各种接插件(图 8.1)。表 8.1、表 8.2 是 RS-232C 的信号线配置。当数据通信端(DTE;Data Terminal Equipment)和数据回线终端装置(DCE;Data Circuit terminal Equipment)连接时为直插式,DTE 和 DTE 连接时为交叉式。

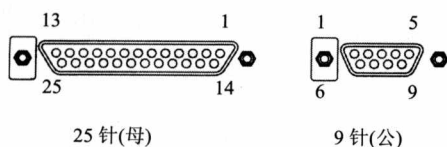


图 8.1 RS-232C 的接插件形状

2. RS-422

RS-422 属于 EIA 制定的串行通信标准

表 8.1 通用 Dsub 25 接插件针脚配置

针脚号	信号名称	备 注
1	FG	保护接地
2	T×D(SD)	发送数据
3	R×D(RD)	接收数据
4	RTS(RS)	发送请求
5	CTS(CS)	清除请求
6	DSR(DR)	数据设备就绪
7	GND	信号地
8	DCD(CD)	载波检测
9~14、16、18、19、21、23、25	—	未使用
15	T×C(2)(ST2)	发送信号定时器 2
17	R×C(RT)	接收信号定时器
20	DTR(ER)	数据终端就绪
22	RI(CI)	振铃指示
24	T×C(1)(ST1)	发送信号定时器 1

表 8.2 DOS/V 机等 Dsub 9 接插件针脚配置

针脚号	信号名称	备 注
1	DCD	保护地
2	R×D	接收数据
3	T×D	发送数据
4	DTR	数据终端就绪
5	GND	接地
6	DSR	数据设备就绪
7	RTS	发送请求
8	CTS	清楚请求
9	RI	振铃指示

之一,是 RS-232C 新一代的互换产品,可以兼容 RS-232C,也被苹果公司的 Macintosh 系列所采用。它的通信形式是对称接口,连接电缆最长可达 1.2km,最高通信速度为 10Mbit/s。

3. IEEE 1394

IEEE 1394 是 1993 年在 COMDEX/ Fall'93 会议上由苹果公司和 IBM 以 FireWire 为名联合发表的 AV 机上的高速串行接口。它能以串级链或树型连接,最多可以挂 63 台设备。与传统 SCSI 相比,它的传送速度分别高达 100Mbit/s、200Mbit/s、400Mbit/s,而无需终端电阻和 ID 序号设定。设备允许热插拔(在工作状态下插拔),由连接电缆提供电源。

目前,连接各种家电的室内 LAN、数码摄像机的外部输出端子(DV 端子)所采用的通信标准就是 IEEE 1394,索尼公司称之为 i.Link 规格。

4. USB

USB 是一种个人计算机与周边设备连接的传送规格,由 Compaq、DEC、IBM、Intel、Microsoft、NEC、Northern-telecom 等 7 家公司开发和制定,结成 USB Implementors Forum 并予以普及。它的基本想法和 IEEE1394 比较相似,能提供多至 127 台设备的串级链或树型连接。周边设备不需要自己提供电源,可以热插、拔。

一度寄予厚望的串行接口 IEEE1394 的推广被停滞不前时,USB 得到普及的机会。USB 的最初版 USB1.0 发表于 1996 年,1998 年改进版 USB1.1 问世。USB1.1 的传送规格有 LS(low speed)模式(1.5Mbit/s)和 FS(full speed)模式(12Mbit/s)两种。无需高速大容量通信的键盘、鼠标、写字板、调制解调器时使用 LS 模式,需要大容量通信的扫描仪、打印机、硬盘、MO 驱动器时使用 FS 模式。为了进一步提高硬盘、MO 碟等可移动存储器的速度,继 USB1.1 之后,2000 年发布了 USB2.0 规格,它的最高传送速度达到 480Mbit/s。

5. IrDA

所谓 IrDA(Infrared Data Association)既代表 1993 年设立的制定短距离红外线数据通信技术的行业团体,也指该团体制定的规格。该规格共有 3 种:1.0 版的通信距离 1m,最大速度 115.2Kbit/s;1.1 版的通信距离小于 1m,最大速度 4Mbit/s;1.2 版(低耗电版)的通信距离小于 0.2m,最大速度 115.2Kbit/s。

它分可见光波长段和红外线波长段两种,通常使用后者,效率较高。发射端用红外线发光二极管激发脉冲光信号,接收端借助于光敏三极管或光敏二极管接收光信号并将其转换为电信号。红外线波长的峰值位于 900nm 附近。

它的数据表现为发光或不发光(0 或 1)两种基本状态,有当信号值下调时分配数据的 RZ 方式和由光信号位置表示数据的脉位调制方式。

6. 以太网(10 Base -T/100 Base -T)

以太网是 1970 年最初由 Xerox(施乐公司)的帕洛阿尔托研究所开发的一种采用 CSMD/CD(carrier sense multiple access with collision detection)访问方式的 LAN。20 世纪 70 年代后期,DEC 和 Intel 加入进来后以太网被商用化(DIX 标准),之后又以 IEEE 802.3 工作小组的 DIX 标准为原型制订了该标准。

有关以太网将在本章的 8.4 节中进行详细介绍。

7. 千兆以太网

千兆以太网是通信速度升至 1Mbit/s 的以太网规格,有 1000 BASE-X 系列标准和 1000 BASE-T 标准两种系统规格。

1000 BASE-X 系列由三种规格组成:1000 BASE-LX、1000 BASE-SX、1000 BASE-CX。其中,LX 使用 1300nm 长波激光(long wave)、SX 使用 780nm 短波激光(short wave)、CX 则使用同轴(coax)电缆作为传送光源。

另一个系统的 1000 BASE-T 是使用与 10 Base-T 和 100 Base-TX 具有互换性的 category 5 的双绞线规格。

8.2 通信方式

8.2.1 层次结构^[5]

为了实现不同机种之间的数据通信,一般都要把网络按照应该具有的通信功能分层化。表 8.3 给出 OSI 基本参照模型,它与国际标准化机构(ISO)制定的网络结构的设计方针“OSI:Open Systems Interconnection”的模型相对应。通信功能被分为七层,各层都定义了标准功能模块。其中第一层(物理层)是为把数据传送到通信线路进行电气变换和机械作业的层。针脚的形状以及电缆的特性

等也在第一层里被规定。第二层(数据链路层)确保与通信对象的物理通信线路,校验通信线路中传送数据的错误。第三层(网络层)选择数据达到对方所经过的通信线路,以及线路内部地址的管理。第四层(传送层)进行数据压缩、错误订正和再发送控制,以便使数据正确且高效地传送到对方。第五层(对话层)负责通信程序彼此发送和接收数据的假想通路的建立和释放。第六层(表示层)把从第五层接手的数据变成用户容易理解的形式,并把第七层送来的数据变成适合通信的形式。第七层(应用层)把利用数据通信的各种服务提供给人或其他程序。

8.2.2 协议

协议是计算机之间通信前必须做出的相互约定的约定集合。作为例子,在这里我们对通过电话线路将计算机接通到网络时拨号连接所经常使用的 PPP(Point To Point Protocol)作简单的说明。

表 8.3 OSI 基本参照模型

OSI 参照模型层次		TCP / IP 层	协议层	
第七层	应用层 规定应用协议	应用层	NFS, DNS, SNMP, POP3, SMTP, TELNET, ...	HTTP, FTP, ...
第六层	表示层 规定数据通信的文字编码和格式			
第五层	对话层 规定数据的接受和终止			
第四层	传输层 规定数据转送控制和应用	传输层	UDP	TCP
第三层	网络层 对方的通路和地址管理	互联网层	IP, ICMP	
第二层	数据链路层 规定连接结点之间的数据传送	网络界面(硬件)层	以太网, PPP, 标识链路等	
第一层	物理层 物理硬件的规定		10 Base, 100 Base, ISDN, 模拟电话等	

PPP 由属于 OSI 参照模型的数据链路层 LCP(Link Control Protocol)和比网络层更高的各种协议(TCP/IP、IPX/SPX、NetBEUI 等)建立的 NCP(Network Control Protocol)

构成。IP 用的 NCP 具有分派发送源和寄送点 IP 地址的功能。在通信开始时,PPP 根据协定确定用 LCP 处理的数据包的最大尺寸,此外还有认证功能和压缩功能,还能支持将来的新协议。在 PPP 上的认证方式有两种: PAP(按照密码识别用户是否伪装)和 CHAP(认证信息的交换方式被暗号化)。

PPP 在以太网上使用的协议被称为 PP-PoE。

8.3 无线

8.3.1 IEEE 802.11

无线 LAN 与有线 LAN 不同,它是靠电磁波或红外线传送数据的。在工厂等生产现场,装备布局频繁变更或是不适合连接电缆线的情况屡见不鲜。在这种情况下,无线 LAN 往往能发挥其长处。

IEEE 802 委员会推进了各类 LAN 的标准化,其中 IEEE 802.11 考虑了有效利用各国有限的无线电波资源的问题,因而无线 LAN 标准得到普及。

无线 LAN 使用波长为 850~950nm 的红外线实现 1Mbit/s 或 2Mbit/s 的传送速度,它现有 3 种标准化方式:①红外线方式(IR:infrared),在 2.4GHz 波段实现 1Mbit/s 或 2Mbit/s 的传送速度;②直接顺序光谱扩散方式(DSSS:Direct Sequence Spread Spectrum);③频率数跳动光谱扩散方式(FHSS:Frequency Hopping Spread Spectrum)。

红外线方式由发光二极管或半导体激光发出频率 3×10^{14} Hz 的红外线传送数据。它不受无线电法规的制约,但是如果在人工发射点和接收点的连接直线上有障碍物就不能传送。

DSSS 方式是用极小的功率把数字信号分散到广带域里同时发送的方式。在通信中即使有噪声,因复原时噪声会被扩散,故它对通信影响较小。因为它不产生强信号,所以不致妨害其他通信。它的抗故障性比 FHSS 方式差,但它的传送速度快,适合多对一通信。

FHSS 方式每隔极短时间(在 0.1s 左右)就改变发射信号的频率。由于不断改变频率,遇到特定频率发生噪声的场合可以由其他频率的通信数据来修正误差,也可以选择

噪声小的频率发射信息。它的抗故障性高,通信隐秘性好,适合多对多的大规模通信。不过在传送速度上比 DSSS 稍差。

8.3.2 蓝 牙

蓝牙是 Ericsson、IBM、Intel、Nokia、东芝 5 家厂商为首提倡的一种针对便携式信息设备应用的无线通信技术。它使用的无线电波段为 2.45GHz,可免申请使用,以 1Mbit/s 的速度通信(改进版预定为 2Mbit/s)。蓝牙与红外 IrDA 不同,只要设备距离在 10m 以内,即使有障碍物也不妨碍使用。蓝牙发送器的尺寸小至仅 0.5in²,耗电比 IrDA 小,制造成本也低。

8.4 LAN

LAN 是 Local Area Network 的缩略,是指在办公室或工厂等有限区域内铺设的数据通信网络。目前使用的 LAN 协议有以太网、令牌环网、FDDI、ATM 等。从 LAN 的规格来看,数据链路层被分为上位分层 LLC(Logical Link Control)和下位分层 MAC(Media Access Control),LLC 针对各种 MAC 层提供与上级网络层共同的服务。MAC 层还规定了框架格式、框架收发信方法、错误检验等。

IEEE 802 委员会主要以物理层和数据链路层为对象对 LAN 制订了标准。在 IEEE 802.11 中对 LLC 层有规定,而 MAC 层在 802.3(CSMA/CD)、802.4(令牌总线)、802.5(令牌环)、802.11(无线 LAN)里有规定。

在 IEEE 802.3 标准的 LAN 里,以太网最为普及,它一般用于制造设备之间的网络连接。表 8.4 列出迄今为止被标准化的以太网 LAN 的种类。早期以太网以同轴电缆为主,目前从价低和施工方便的角度出发,绞合线电缆已经成为主流。按照多媒体通信的不同需要,传送速度有 1Mbit/s、10Mbit/s、100Mbit/s 几种,1Gbit/s 的千兆以太网也已面世。

表 8.5 和表 8.6 以典型性的 LAN 为例表示了 10 Base-T、100 Base-T 的规格。10 Base-T 的“10”,100 Base-T 的“100”分别代表以太网的传送速度,“-T”表示双绞线电缆。

LAN 传统的网络形态(拓扑)属于总线型,为了确定故障计算机和便于办公室布局的变更,现在越来越多地变成星型。如果是集线器型和星型网络,连接 PC 机的台数越

表 8.4 IEEE 802.3 的标准种类

标准名称	内 容
10 BASE 5	粗 1cm 黄色同轴电缆的 10Mbit/s LAN。拓扑逻辑为总线形。最长 500m
10 BASE 2	粗 5mm 简易同轴电缆的 10Mbit/s LAN。拓扑逻辑为总线形。最长 185m
1 BASE 5	双绞线电缆的 1Mbit/s LAN。最长 500m
10 BASE-T	双绞线电缆的 10Mbit/s LAN。拓扑逻辑为星形。最长 100m
10 BASE-F	多模光纤电缆的 10Mbit/s LAN。拓扑逻辑为星形
10 BROAD 36	同轴电缆的 10Mbit/s 宽带 LAN。拓扑逻辑为星形。最大 3600m
100 BASE-T	双绞线电缆的 100Mbit/s LAN。拓扑逻辑为星形。最长 100m

表 8.5 IEEE 802.3 标准“10 BASE-T”(基带方式)的主要规格^[2]

项 目	内 容
媒体通路控制(MAC)	CSMA/CD
网拓扑逻辑(布线形式)	星形
传送速度	10Mbit/s
调制方式	基带
传送符号	曼彻斯特代码
传送媒体	线径 0.4~0.6mm 两对(4 芯)无被覆双绞线电缆(UTP326AWG~22AWG)1 组双线传送以太网信号,另 1 组双线接收以太网信号(是同轴以太网时,1 条同轴电缆即可收发)
阻抗	100Ω
最大段长	100m
MDI 连接器	RJ45 8 pin module connector (ISO 8877 标准)
AUI 接口	与 10 BASE 2,10 BASE 5 有互换性

表 8.6 IEEE 802.3 标准“100 BASE-T”(基带方式)的主要规格^[2]

名称	100 BASE-T		
项目			
标准名称	100 BASE-T4	100 BASE-X	
		100 BASE-TX	100 BASE-FX
标准意义	使用 4 对 UTP	使用 2 对 UTP/STP	使用双芯光纤

续表 8.6

名称 项目	100 BASE-T		
媒体通路控制 (MAC)	CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA/CD
传送速度	100 Mbit/s	100 Mbit/s	100 Mbit/s
MAC 帧	802.3 MAC 帧互换	802.3 MAC 帧互换	802.3 MAC 帧互换
传送媒体	4 对 UTP Category 3/4 /5 型	2 对 UTP Category 5 型 2 对 STP(150Ω)	双芯多模光纤
传送距离	1 link: 100 m 2 repeater: 200 m	1 link: 100 m 2 repeater: 200 m	1 repeater: 300 m 末端与末端直接相连: 400 m
传送符号	8B6T	4B5B NRZ/MLT-3	4B5B NRZ

多,分配给每一台的传送速度越低,为了改善这个问题可以使用能占有各台计算机最大传送速度的转接集线器。

8.5 WAN

WAN 是 Wide Area Network(广域通信网)的缩写,是指连接分离两地的 PC 机起到数据交换作用的通信网。WAN 一般由电话线或专用线构成,如 ISDN、帧转接、ATM(单元中继的一种)等。它们被称为保障型,即能保证通信带域、错误率等服务质量(QoS)。反之,后面会讲到,如果是互联网上使用的网络(IP网),随着网络的通畅状况的变化,通信速度和延迟性都会发生较大变动,因此它被称为最佳型。

8.5.1 ISDN

ISDN 是能够综合处理电话、传真、数据通信的数字通信网,属于国际电气通信联合电气通信分会(ITU-TS)制订的标准。在日本,NTT 以“INS 网”的名称提供服务。现在各国提供的服务几乎都是以普通电话线作为硬件使用的 N-ISDN,由 3 个频道(逻辑电路)构成。

ISDN 中通信速度为 16Kbit/s 的 D 通道(1 根)供控制使用,64Kbit/s 的 B 通道(2 根)供通信使用。因为两个通道可以同时使用,

所以能一边打电话一边连接互联网。如果把两根线合并使用,通信速度可以高达 128Kbit/s。

8.5.2 帧转接

帧转接是利用光纤传送的高可靠性,将 X.25 数据包通信使用的错误检测协议或流程控制协议等加以简化,来提升速度。它仅规定了 OSI 参照模型的物理层和数据链路层的核心功能,所以允许网络上层任意选用用户中意的协议,如 TCP/IP 等。

8.5.3 ATM

与目前的电话网预先定时同步传送信息的 STM(Synchronous Transfer Mode)方式不同,ATM(Asynchronous Transfer Mode)仅需要在需要传送数据的时候才把数据送到网络上。

ATM 的协议应该归入连接型数据包交换方式,使用逻辑通信线路实现单元传送。逻辑通信线路由实际运输数据的逻辑线路(VC: Virtual Channel,虚拟通路)和虚拟路径(VP: Virtual Path,即把多条 VC 捆绑在一起)组成。ATM 的协议由物理层、ATM 层、ATM 适配层(AAL)构成。ATM 层在 48 bytes 数据上附加 5 个字节的单元头生成 ATM 单元然后送到物理层处理。AAL 层的作用是整合声音、画像、数据等不同特性的通信服务性能和 ATM 层的处理能力,为各种服务规定了不同的类型。用 ATM 传送的数据都被分割成单位(称为单元)进行高速收发,因此利于其传送多媒体等大容量信息。另外,光纤的优点是数据传送的速度能达到 156Mbit/s。ATM 用于多重通信,而且能自由地设定各种信号的传送带域,所以能混合传送声音、静止图像、动画等数据。名古屋大学和早稻田大学联合开展的多媒体远程医疗实验就是一个例子。

8.5.4 传送延迟

虽然保障型通信网在带宽上有所保证,但是随着建立连接时的网络状态的变化,往往不可避免地会发生传送延迟。如 ISDN,在同一地区(都道府县)内通信的传送延迟约为 16ms,在地区(县)之间(如札幌—东京)则为 30ms 左右。如果换成卫星通信,延迟约

达 325ms^[6]。

应该指出,ATM 的延迟比 ISDN 短,约为 1.9ms^[7]。

文献报道了很多使用 ISDN、ATM 构筑远程操作系统的例子,其中不少研究发现网络环境加上计算机系统处理时间等因素的影响,延迟时间会比上述结果更长。将这些带延迟的网络接入反馈回路,会带来稳定性方面的诸多问题。为了解决这些问题,在不少场合采取令本地一侧系统持有自主性,而在远程一侧构建由仿真器组成的边预测状况边支持操作的系统。我们从报道中还看到一些基于虚拟现实技术提高操作性能的研究事例。

8.6 互联网

互联网是通过通信协议 TCP/IP 把全世界的网络相互连接起来的庞大的计算机网络。它起源于美国国防部高等研究计划局(ARPA)发起的分布型计算机网络研究项目“ARPAnet”。1986 年,美国以 ARPAnet 的技术源为基础构筑了连接全美学术机关的网络 NFNnet。该网络于 20 世纪 90 年代中期逐渐被商用化,成为现在的互联网。

在学术网络的那个时期,它的主要作用还是充当电子邮件网络和新闻网络。1994 年,具备 hyper link 功能的 multi media document system “WWW”出现后,在商务和家庭方面的应用激增,使其占据了世界规模的信息通信的基础地位。

互联网的发展也促进了机器人控制领域的远程维护、远程操作、操作者互相交流等技术的发展。

8.6.1 WWW

WWW(World Wide Web,万维网)是互联网上超文本页面(hyper text page)的巨大集合体。在互联网网站上独立的 HTML 页面中的信息被超文本链接所连接,经过 Web 浏览器进行网页的搜索和链接。

WWW 是由客户-服务系统实现的,它的技术构成有以下 3 个部分:①hyper text 语言 HTML;②客户端和服务端端的传送协议 HTTP;③唯一识别互联网资源的地址方式 URL。

1. HTML

HTML(Hyper Text Markup Language)是基于所谓的 SGML(Standard Generalized Markup Language)国际标准(ISO 8824)的文书结构记述语言开发的。使用 tag 记号来标志文书结构和属性。在 SGML 中限定了能够自由定义的 tag,与文书的结构化相比,它更着重于表示的语言。

2. HTTP

(参照 <http://yougo.ascii24.com/gh>)

HTTP(Hyper Text Transfer Protocol)是从 WWW 服务器端对客户端的 HTML 记述文档进行收发的通信协议。它是由请求和响应构成的简单协议,请求和响应对应于独立的通信单位。

HTTP 的缺点是每读取一次数据都需要连接到服务器端,获得数据之后又要把连接切断(把一次操作称为 session),所以当一次操作涉及若干个 Web 页面时,从某一个页面转换到其他页面后状态无法得到保持。例如,进行搜索数据库的再处理(以前次的搜索结果作为对象再次进行搜索)就很困难。

3. URL

(参照 <http://www.wdic.org/>)

在 URL(Universal Resource Locator)所规定的资源的定义子集中来表示资源的位置。在 RFC 1738 里规定了它的正式表达式。以下例加以说明。

【例】 [http://user.pass@](http://user.pass@www.example.com:80/-foo/index.html)

- (a) (b)
- [www.example.com:80/-foo/index.html](http://user.pass@www.example.com:80/-foo/index.html)
- (c) (d) (e)
- (a) skimmer(http,ftp,news 等)。
- (b) 用户名及密码。
- (c) 主机名。
- (d) 端口号。
- (e) 路径名。

8.6.2 安全

信息通信系统的安全技术已经从消极目的(如防止犯罪行为和灾害对系统的破坏等)转到积极目的(如确保电子商务的信用度等)。在生产领域里,由于网络的通信效率高,所以通过网络交换 CAD 信息和生产管理

信息的应用也多了起来,安全技术是重要的技术保障。

满足信息安全的主要技术措施有:

(1) 暗号 把信息变成暗号可以保护秘密或隐密性。有时暗号还被嵌入到其他安全技术之中,总之,暗号属于安全技术里最基本的技术之一。

(2) 实体认证或对象认证 通过认证通信对象是否为对象本人来防止他人假冒。

(3) 数据完整性/信息认证 在信息后面附加检查数据完整性的符号来检验数据是否被篡改。

(4) 数字签名 在信息后面附加数字签名,以防他人假冒和数据被篡改。

(5) 访问权控制 对信息系统的访问实施权限管理以防无权限者不正当入侵和计算机病毒的攻击。

(6) 防火墙 在信息系统本体与网络的结合部之间设置具有防火墙功能的系统,防止无权限者的不正当入侵和计算机病毒的攻击。

(7) 否认防止 在事后确认信息的收发和交换,起到了公证的效果。

(8) 文件双重化 在相同场所或相隔两地分别保管文件的复本,当人为或灾害造成信息破坏后有复原的可能性。

(9) 监视或监察 检查各种威胁的存在并分析原因。

8.6.3 VPN

VPN(Virtual Private Network)是利用公众网和共有网拓展私设网的一种网络技术。如果 VPN 利用互联网作为共有网,那么称为“互联网 VPN”。借助于该技术不仅可以利用互联网,也能进入虚拟私设网。

VPN 主要由:①认证;②信道连接技术;③暗号构成。

为了防止被监听,认证多采用询问与应答(challenge and response)的方式,针对连接客户端的请求,服务器端发出询问关键字。客户端收到关键字后应把由询问关键字和密码组成的新密码送回服务器端,在这里回送的密码与原先送出的询问密码彼此对照完成认证工作。

信道连接把发往私有 IP 地址的数据包,

用发往全局 IP 地址的数据包进行压缩,起到了如同信道的效果。

暗号具有把普通句变换成暗号句的功能,经算法处理过的参数称为暗号钥匙。暗号算法分为对称算法和非对称算法。前者在暗号编码和解码时共有一把钥匙。钥匙需要保密,所以被称为“共有钥匙方式”、“秘钥方式”。后者的暗号的编码和解码用不同的钥匙,如果编码用公开钥匙,就被称为“公开钥匙方式”。

典型的对称算法有 IBM 开发的 DES(Data Encryption Standard),在改变暗号钥匙的同时重复三次 DES 编码,称为 3 DES(tripple DES)。典型的非对称算法有 RSA,它用计算机求解素因数分解,所以解码相当困难。

8.6.4 QoS

互联网目前仅能传送数据,不适合传送声音和图像等实时信息,其原因是最佳(best effort)型服务无法提供在数据传送延迟时间、延迟变化、数据包丢失等方面的保证。这样的特性显然不适合对实时性很强的机器人进行控制。

为了克服这些缺点,可以借助于服务品质(QoS:Quality Of Service)技术。它的特点是针对特定的服务可以优先传送数据包,这样就容易确保实时通信的质量。

1. RSVP

进行 QoS 控制,需要在数据包的头文件里添加表示“优先”的符号,以便使其与其他数据包区别开来。这种协议的代表形式就是 RSVP(resource reservation protocol)。

在被发送的数据流的末端(或路由器)对路由器发出确保带宽的请求,于是路由器就把请求的带宽分派给数据流。此时确保带宽请求的交流协议就是 RSVP。这有一点类似于马路上为公交车优先行驶而设置的车道。

RSVP 属于 IP 协议上级层的副协议,不属于传送应用数据自身的协议或路由协议,而是类似于 ICMP(Internet Control Message Protocol)和 IGMP(Internet Group Management Protocol)的控制协议。

RSVP 可设计成单址通信或多址通信。例如,若是管理多址通信组合的 IGMP,各个

主机为了参加多址通信组合而发送 IGMP 信息。一旦主机使用的应用程序需要预约资源,那么它就立即沿着传输数据的多址通信组合信道发送预约资源的 RSVP 信息^[1]。

2. DiffServ

RSVP 要求凡是位于资源(宽带)预约请求路径上的所有设备都必须安装 RSVP,所以在数据包经由路径不确定的互联网环境中实现起来颇有困难。此外,互联网原先提供的宽带容量就不足,使用 RSVP 后很可能造成实际上只有高优先级用户才能享受带宽服务的问题,导致共有网络利用率的下降。

于是出现一种 differentiated service(以下简称“DiffServ”),它是一种利用 IP 结构内已有的 TOS(服务类型:Type Of Service)领域向用户提供互联网上 QoS 服务的技术,已经被 IETF(Internet Engineering Task Force)标准化。DiffServ 能根据应用程序对网络特性的要求(延迟、时间变化、数据包丢失等造成的影响)和 traffic 提示的优先顺序提供合适的 QoS,而且 DiffServ 的结点(比如,路由器和第三层开关)可以决定如何处理 traffic 和维持怎样的 QoS,同时向下一个路由器(next hop)发送数据包。

DiffServ 是路由器单位的 QoS 控制。虽

然并非保证端点对端点的 QoS,不过相对于 RSVP 来说它显示出路由器内存消费合理和 CPU 占用较小的优点。

下仓健一朗

8.7 内部 LAN

8.7.1 目的

多自由度机器人系统的每个自由度都需要提供源动力和控制信号,还需要将分散的传感器信息集中起来。如果每个自由度都配置星型连接,配线、质量、刚性等都会对机器人系统的机械结构、设计和控制带来较大的影响。此时可以采用内部 LAN 的配线方式。对内部 LAN 的要求如下:

- ① 串行总线。
- ② 实时性。
- ③ 紧凑。
- ④ 可扩展性。
- ⑤ 开放性(相互通用性)等。

下面就从这些条件出发,介绍上述通用规格的 USB、IEEE 1394 以外的,适合工厂自动化(FA:Factory Automation)和机器人应用内部 LAN 规格。

表 8.7 列举出与 FA 网络相关的标准化资料^[2]。

表 8.7 与 FA 网络相关的标准化资料^[2]

项 分 类	概 要	集成框架结构 (CIM 作业框架组、 基本创意……)	协议概况	工 具	应用软件	系统实例 (De-fast)	注 释
ERP (Enterprise Resource Management)	ERP 功能 S/W 程序包 * (OMG-Mfg DTF)	OMA CORBA-JAVA Web	ORB, IIOP JavaBeans, …关联协议	UML, XMI, XML, IDL, JAVA, …	end-user (presentation views) business objects (logical views, entities, tasks) back-end (databases, TP Monitors, wrapped legacy applications …)		CORBA, JAVA, WEB 关联的模块软件
SCM (Supply Chain Management)	SCM 系统	SCM 处理模型 Web	EDI Translator EDIFACT/ CII/EIAI/SET	IDL P-Lib	EDI 服务程序包	综合 EC/EDI	
PPE (Product and Process Engineering)	SC4 与含有形状数据的产品管理数据交换共用的标准化	STEP(SC4)	AP 203+ Pt21/22 (SDAI)	EXPRESS (SC4)	STEP 编译	靠 CAD 系统支持 PDESinc, PROSTEP, 等多项应用	

续表 8.7

项 分 类	目 概 要	集成框架结构 (CIM 作业框架组 基本创意……)	协议概况	工 具	应用软件	系统实例 (De-fast)	注 释
PPE (Product and Process En- gineering)	PPE 系 统 * (OMG-Mfg DTF)	OMA CORBA JAVA Web	ORB, IIOP JavaBeans Web 相关	UML, XMI, XML, IDL, JAVA, ... STEP, P-Lib DXF, IGES	end-user business objects back-end		在 OMG 中正 与 SC4 组 进 行协调工作
	PPE 系 统 (MS 数 据 库)	OLE, DCOM	Web 相关 OLE, DCOM 相关	Active-X VBscript STEP, P-Lib DXF, IGES	各种 Windows 库 CAD/CAM 软件	CAD/ CAM/ CAE 系统	
MES (Man- ufacturing Execution System)	JOP 生产系 统模型专业 委员会 *	JOP 生产系统模 型 SIMA, SEMATECH	LAN 协议企 业 WAN 内部网 (HT- TP)	UML JAVA	OpenMES	Open-MES 演示系统	
	MES 系统 * (OMG-Mfg DTF)	CORBA: 例: SIMA 参考模型, SEMATECH	ORB, IIOP IIOP base ORB JavaBeans	UML, XMI, XML, IDL, JAVA, ...		SIMA 系统 SEMATEC 系统	
MC (Machine Control)	MC 集 成 系统 (ODVA, ...)	SC 5/WG5- Part 1, 2 装置 (机械)模型	CAN	UML, XML	ODVA, CiA, ... 是协会名, 有实 际成果	同左	
	JOP 控制网 络专业委 员会	FA 控制网 络 (JOP) SC 5/WG5- Part 1, 4	FL-net ISO 8802/3, UDP/IP, FA 关联协议	C 语言 (FA 关联协议)	Windows 基本应 用软件	FA 控制网 络, 控制监 视系统	
	SC2 术语和特性	IS 8373 MIR- Vocabulary	无	无	无	无	
	SC2 程序语言 机器人语言			DIS 15187 (GUI-R) TR10562 中间语言	GUIR 对应工具 中间语言对应 工具	VDMA (Stuttgart)	
	SC1 NC 语言	SC1 WG4 中的 一系列活动	无	IS 3592, 4342, 4343,	APT 系统 FAPT, EXAPT...	无	
	SC1 数据模型	SC1 WG7 CNC 数据模型、 处理数据模型	Manufactur- ing Feature Machine Feature, Machining Profile	EXPRESS, JAVA	SCAM		Generic Modular Structure with abstract data type for various Features and Profiles
	SC2 Open Net- work Inter- face for in- dustrial Ro- bot	Robot Access Object/Model *	独立协议 * (ORIN)	Windows/ DCOM 其他	成员公司用于机 器人装载的软件	ORIN 演 示系统	
	IEC 现场总线标 准化	OSI 结构	Fieldbus 7 种方案多 个工作小组	各小组有不 同工具	各小组有应用	各小组协 作体有应 用业绩	IEC/SC 65C

续表 8.7

项目 分类	概要	集成框架结构 (CIM作业框架组、 基本创意……)	协议概况	工 具	应用软件	系统实例 (De-fast)	注 释
MC(Machine Control)	OMAC	OMAC 结构 (TEAM API 参 照模型)		IDL 其他	OMAC core module (compo- nent-ware)		TEAM-ICLIP (NIST)OMAC user committee
	OSACA	OSACA 结构(参 照 NC, RC, PLC, CC 定义结构)	ASS, MTS, Common Shared Memory, Future bus, TCP/IP Stack, ISDN...	Object Ori- ented Tools	AO(Applica- tion Object Modules), HMC(Human Machine Control), AC(Axis Control)	OSACA- Demonstrator of FISW	中立 NC, RC, PLC, CC Ref- erence Archi- tecture Specifi- cations for the System Plat- form of Defini- tion Communi- cation, Organi- zation, Meth- od, OS and Ac- cess
	JOP 开放控 制器专业委 员会 (RA- PI)	PAPI (JOP 版开 放 NC 的 API)	基本/扩展 API	C		MECT'99 Demo sys- tem	Focus on the application to legacy systems
PDM (Product Data Management)	SC4 PDM Standardi- zation	STEP(SC4)	AP 203, Pt21/ 22 (SDAI) (SC4 Activity)	EXPRESS (SC4)	STEP Com piler	PDESinc., PROSTEP, ...	
ERP- SCM-PDM	SAP	SAP 模型	简版 SAP(例 如, SAP-RFC)	SAP 模块设 计工具(例 ABAP/4)	参数化 SAP 软 件包	SAP 应用 系统	非开放系统。 需求用 SAP 方案开发。 作为内外的 工业中的 ERP 系统有 很多实际成效
		(ERP Model)		ARIS (IDS)	ARIS Tool Set	对 应 SAP, BAAN	
MES-MC	AFNOR, CDM, DTI 及其他	SC5/WG5-Part 1,3	EN...库	UML, XML, EN...为各小 组的专门工具	各小组协作体有 应用	同左	
	JOP 分布式 制造系统委 员会	分布式制造系统 结构(JOP)SC5/ WG5-Part 1,4	ADS-net(基 于 Ethernet 的自主分布 网络)	UDP/IP	Windows, UNIX, 各公司 PLC 用 OS	各种监视 控制系统	
PPE- MES-MC	SC5/WG4	MAPLE 功能结 构(SC5 WG4)	MAPLE 服务 & I/F (SC5 WG4)	IDL			
		SC5/WG4 NWI (CORBA, WEB)	Manufactur- ing S/W Ca- pability Pro- filing *	UML? PSL? XML?			

续表 8.7

项 分 类	目 概 要	集成框架结构 (CIM作业框架组、 基本创意……)	协议概况	工 具	应用软件	系统实例 (De-fast)	注 释
ERP-MES- SCM-PDM- PPE-MC	企业模型 (SC5 WG1) OMG, NIIP 及其他	无	?	PSL 波尔多大学 CMU 及其他	?	?	WG5 NWIP
		CORBA	NIIP 协议				

*:表示正在开发中

表中未记录的有关 TC184 标准化规格,其活动内容例举如下:

IS 9409	MIR—Mechanical Interface
IS 9787	MIR—Coordinate Systems and motions
IS 9946	MIR—Presentation of characteristics
IS 10218	MIR—Safety
IS 9283	MIR—Performance criteria and related test method
IS 11593	MIR—Automatic End—Effector Exchange Systems
TR 11032	Application Oriented Test—Spot Welding
TR 11062	EMC Test method and performance evaluation criteria guideline
TR 13309	Informative guide on Test equipment and metrology method of operation for Robot Performance evaluation
DIS 14539	MIR—Vocabulary of Object handling with end effectors and characteristics of grasp-type grippers

8.7.2 规格

美国 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 按照数据长度把连接现场设备的网络划分为 3 类: 以位 (bit) 为单位的网络、以字节 (byte) 为单位的网络、数据网络三种。前两种通称为传感器总线, 后者称为现场总线 (图 8.2)。

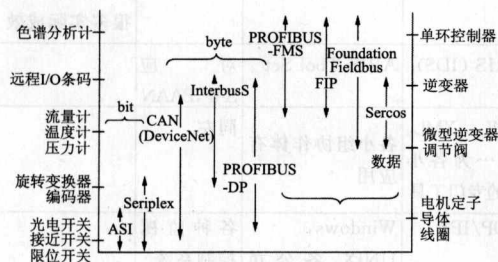


图 8.2 现场网络^[1]

这类网络统称为现场网络或现场局域网。它们采用分层结构, 传感器总线用于把按钮开关、光电、接近开关、限位开关等一类开关形式的分散 I/O 信号传送到上一级系统 (图 8.3)。现场总线以高性能的智能装置和设备为对象提供复杂的通信功能。

1. MAP

在一个工业网络中, 称作现场总线 (field bus) 的规格其实很多。早期人们基于 ISO 7498, 参照 OSI 的 7 层模型, 开发了许多种类的将工厂内部各种设备、装置互连和共享的现场总线, 例如美国 GM (General Motors) 公司的 MAP (Manufacturing Automation Protocol)^[3]。在这些总线中既有完全对应于 OSI 的 7 个层次的完整 MAP, 也有简化的、着重实时性的小型 MAP, 但是它最终没有得到充分的普及。

2. PROFIBUS

PROFIBUS 由几个部分构成, 即以连接 FA 控制的工作站单元级 (station cell level) 为主的 PROFIBUS-FMS、传感器总线 PROFIBUS-DP, 以及 PROFIBUS-PA (以传感器总线为基础并附加过程控制功能), 形成了公认的德国国家标准 (DIN 19425) 和欧洲标准规格 EN 50170 之一。

PROFIBUS 以令牌总线和主从方式作为总线访问的基本形式, 而应用层则采用 MMS (Manufacturing Message Specification) 的子集 FMS (Fieldbus Message Specification) (PROFIBUS-DP 除外) (表 8.8)。

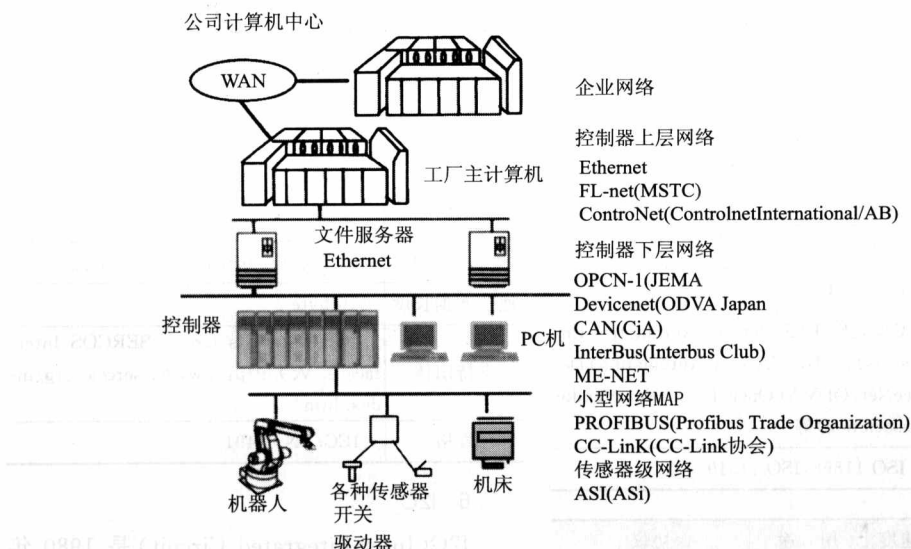


表 8.8 PROFIBUS-DP

协议堆栈	下级 2 层和 DDLM
访问方式	Master-master:令牌总线(token bus) Master-slave:轮询(polling)
传送速度	9.6Kbit/s~1.5Mbit/s
拓扑逻辑	总线型、树型、星型
电缆	4 线双绞线电缆光纤
连接局数	126 局
通信数据长度	最大 244 byte
支持团体	PROFIBUS International 日本 PROFIBUS 协会 http://www.profibus.jp/
规格	DIN 19245

3. Interbus

Interbus 是德国 Phenix contact 公司在 1987 年开发的,在欧洲与 PROFIBUS 一样有很高的市场占有率。它采用 master/slave 方式作为总线访问的基本形式,其特点在于能用全帧(total frame)传送方式进行发送,这是一种特殊的通信方式,将送往 slave 的所有数据集成为一帧,有利于实现小型化和高速的通信(表 8.9)。

表 8.9 Interbus

协议堆栈	下级 2 层+AP 层
访问方式	全帧传送方式(master-slave 方式,分时扫描)
传送速度	max 500Kbit/s

续表 8.9

协议堆栈	下级 2 层+AP 层
拓扑逻辑	特殊回路
电缆	5 线双绞线电缆光纤
连接局数	256 局
通信数据长度	4 bit~64 Kbyte
支持团体	Interbus Club http://www.interbus-club.com/
规格	DIN 19258

4. CAN

CAN(Controller Area Network)是德国 Robert Bosch GmbH 为节省汽车配线系统而提倡的串行接口规格。由于它的可靠性高并得到巨大的汽车市场提供的廉价、稳定的专用半导体器件的支持,结果它不仅在汽车领域,在以 FA 为首的其他控制领域也得到广泛应用。在德国 GMD,已经开发出在 GMD snake 机器人上控制应用的例子^[4],以及机器人控制器应用的例子^[5]。在这些例子中,CAN 被用于数据链路层,而 DeviceNet 用于应用层(表 8.10 和图 8.4)。

表 8.10 CAN

协议堆栈	下级 2 层
访问方式	CSMA (Carrier Sense Multiple Access)/NBA

续表 8.10

协议堆栈	下级 2 层
传送速度	高速(ISO 11898):125Kbit/s~1Mbit/s 低速(ISO 11519):125Kbit/s 以下
拓扑逻辑	总线型(主线、支线)
电缆	5 线双绞线电缆
连接局数	64 局
通信数据长度	0~8 byte
支持团体	CAN;SAE(Society of Automotice Engineers), CIA(CAN in Automation) DeviceNet; ODVA(Open DeviceNet Vendor Association)等
规格	ISO 11898, ISO 11519

等级	通信速度	用途	协议
等级 A	~10Kbit/s (车身)	灯、照明类 动力窗口 门锁 动力座椅 无锁开启等	各种汽车厂家原协议
等级 B	10Kbit/s~ 125Kbit/s (状态信息)	电子仪表 驾驶提示 自动空调 故障诊断	低速 CAN (~125 Kbit/s) J1850 VAN
等级 C	125Kbit/s~ 1Mbit/s (实时控制)	发动机控制 传送控制 刹车控制 悬架控制 ABS 等	高速 CAN (125 Kbit/s~)
等级 D	5Mbit/s~ (多媒体)		D2B 光学 MOST

图 8.4 CAN 的应用举例

5. SERCOS

SERCOS(serial real-time communication system)是面向 NC、电机等多轴实时运动控制和同步控制的数字接口规格(IEC/EN 61491)。它采用光数字接口,其特点是节省配线、分辨率高、抗干扰能力强。NC 控制器(master)和伺服电机放大器(slave)之间靠光纤连接,数据传送只在 master/slave 之间进行,适合高速同步控制(表 8.11)。

表 8.11 SERCOS

协议堆栈	下级 2 层
访问方式	Master-slave 方式(可以是 multi master)
传送速度	2/4/8/16 Mbit/s
拓扑逻辑	环型
电缆	光纤
连接节点数	8 节点/master,最大为 254 节点
通信数据长度	16 byte
支持团体	IGS(Interests Group SERCOS Interface e. V.) http://www.sercos.org/index.htm
规格	IEC/EN 61491

6. I2C

I2C(Inter-Integrated Circuit)是 1980 年由飞利浦公司推出的用于 CPU、内存等设备之间的串行通信规格(表 8.12)^[7]。I2C 实现主板内近距离串行通信。如图 8.5 所示,I2C 用 serial data(SDA)和 serial clock(SCL)之间的两条线即可以将一个 master 与多个 slave 设备连接起来,具有多主通信和调停功能。图 8.6 给出了它的数据格式的例子。数据包含各 slave 的 7 bit 或 10 bit 地址,slave 每送一个字节数据就返回一个 ACK 信号,边互相确认边传送数据。I2C 的特点是可以十分简便地连接 CPU 和周边设备构成系统,所以它多用于机器人的分散控制^[8~12]。

表 8.12 I2C

协议堆栈	下级 2 层
访问方式	Master-slave 方式,多主(multi-master)方式也可
传送速度	100 Kbit/s(standard mode)400 Kbit/s (fast mode) 3.4 Mbit/s (high speed mode)
拓扑逻辑	总线型
电缆	双线(serial data(SDA) and serial clock(SCL))
连接节点数	地址 7/10 bit/s,总线容量小于 400pF
通信数据长度	总线容量小于 400pF
支持团体	Philips http://www.semiconductors.philips.com/buses/i2c/facts/
规格	

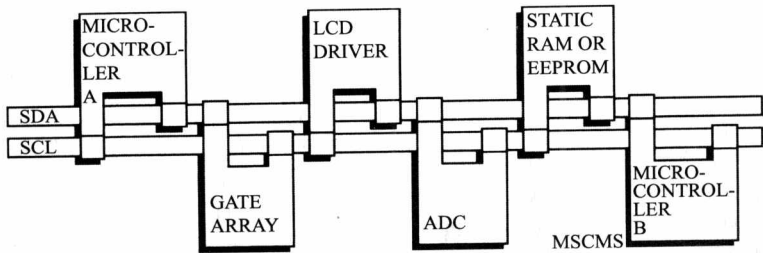


图 8.5 I2C^[7]

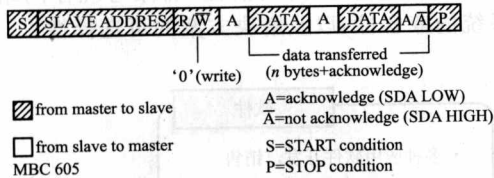


图 8.6 I2C 数据格式举例(7bit 地址)^[7]

7. FL-net(OPCN-2)

FL-net 是由日本制造科学技术中心(MSTC)旗下的 JOP FA 控制网络专门委员会于 1996 年开发的。它介于企业级信息网络和远程 I/O(或传感器)信息传送现场网络之间,主要在可编程控制器(PLC)、机器人控制器(RC)、数控设备(NC)等控制设备和控制 PC 机之间实现控制信息、生产技术和信息管理等数据的交换^[13,14]。FL-net 的物理层/数据链路层使用以太网,传送层和网络层使用 UDP/IP,上级层为 FL-net 定义的协议。该协议支持定周期的循环传送(收集各个结点的数据)和定周期的信息传递(通知特殊事件),如表 8.13 所示。

表 8.13 FL-net(OPCN-2)

协议堆栈	物理层/数据链路层以太网+传送层/网络层(UDP/IP)+独立 FA 链接协议
访问方式	令牌总线方式无主方式 UDP/IP+循环独立通信协议
传送速度	10Mbit/s
拓扑逻辑	总线型
电 缆	10 Base 5, 10 Base 2, 10 Base-T(以太网电缆)
连接节点数	254 节点(有转发器)无转发器的为 100 节点
通信数据长度	10 Base 5: 500m(2500m), 10 Base 2: 185m(925m), 10 Base-T: 100m(500m) ()内为有转发器条件

续表 8.13

支持团体	日本电机工业协会(JEMA) http://www.jema-net.or.jp
规 格	JEM 1479, JEM 1480, JEM-TR 213, JEM-TR 214 等

8.8 通信接口系统描述

8.8.1 背 景

在构筑由 SCM、ERP 组成的系统时,为了促进 FA 系统中各种设备的相连和信息交换,将这些功能以标准规格和形式加以记述后再通过网络连接起来,这种必要性正在与日俱增。正如 8.7 节所述,FA 控制器的 PC 化已经形成全世界的大趋势,与此同时发挥基于 PC 的开放系统的优点也形成一种大趋势^[1]。表 8.14 给出了机器控制器(机床、机器人等)开放式网络的分类。

以往,日本的机器人制造企业都是自成体系的,以强大的技术实力并未依托彼此而独立地开发机器人和控制器产品,使日本成为引领世界的最大的机器人生产国,这些性能优越的机器人系统满足了多种用户的需求。但是,随着机器人的应用领域和作业对象的进一步扩大,如果机器人生产厂家和用户仍然不得不面对建立系统、演示、运用、维护等都互不兼容的状况的话,普及就将遭遇空前的困难。

表 8.14 开放式网络分类

通信级	利用形式	关联技术
计算机间通信层	PC 机与机器控制器之间的通信。进行控制器状态监视、动作指示、控制器动作程序管理等	以太网

续表 8.14

通信级	利用形式	关联技术
控制器间通信层	控制器之间互相通信。执行实时 I/O 数据、控制器之间信息交换等	Control Net; ME-NET FLnet
设备间通信层	控制器与简单周边设备通信。执行阀、开关、显示器等的控制	Device Net, Interbus-S, PRO-FIBUS-DP
驱动器间通信层	控制器和电机驱动器之间的通信。执行电机驱动器的控制	SERCOS

工厂内部网络化的主要目的就在于削减系统组建的总成本(包括布线、开发、维护、教育等成本),增加变更系统的柔性。要实现这些目的,网络应该满足以下要求:

- ① 网络的柔性。 ② 廉价。
- ③ 便捷性。 ④ 高可靠性。

如果今后工业机器人系统打算扩大需求领域,那么它必须发挥 IT 和开放式网络的长处,增加应对客户的灵活性,确保与现存网络系统的兼容性,以及解决方案的可选择性。

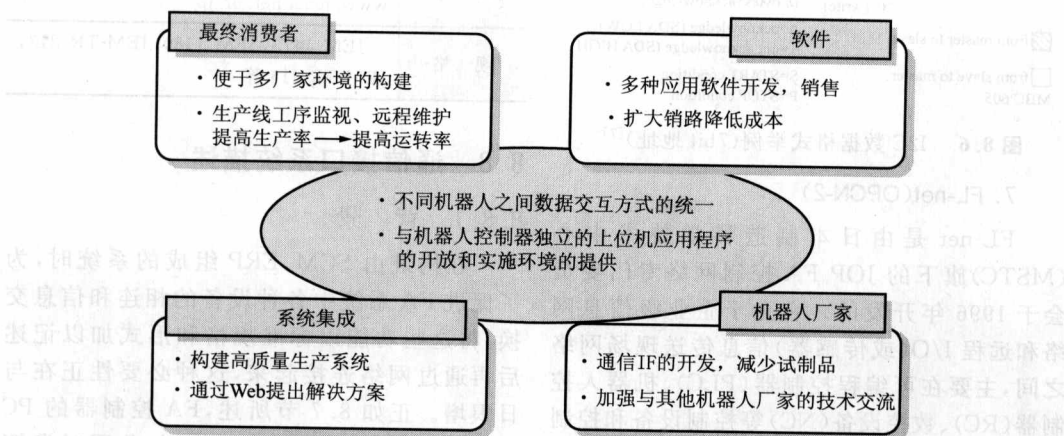


图 8.7 ORiN 的优点

8.8.2 开放式网络接口

日本机器人工业协会在 1997 年集结了日本主要的机器人供应商和大学、研究机构的研究人员,基于机器人控制器内部数据开放化的思想,提出了通过网络实现机器人之间信息交换的开放机器人体系结构概念,制定了机器人网络接口标准(ORiN: Open Robot interface for the Network)。

1. 目的

开发 OriN 的目的是制订 PC 机与机器人控制器之间通信接口的标准,即力图在调用 PC 机应用软件时使用的通信接口规格和数据文件规格的通用化。由此得到如图 8.7 所示的优点。由于它规定了适配其他 FA 设备的模块,数据交换的标准规格就能够得到广泛认同,于是在下面 4 个方面将取得显著成效:①提高制造竞争力;②扩大机器人市场;③有利于软件产业进入机器人市场;④加速机器人应用工程的产业化。

2. 概念

ORiN 定义了描述机器人标准化框架的虚拟机器人的等级。ORiN 对这个虚拟机器人还规定了供应商提供的实际机器人的信息接口。遵从这些规定,应用程序一旦需要机器人信息,直接通过 OriN 访问机器人内部即可,无需关心实际机器人的结构如何。图 8.8 和图 8.9 分别表示了 ORiN 的组成概念和虚拟机器人模型。

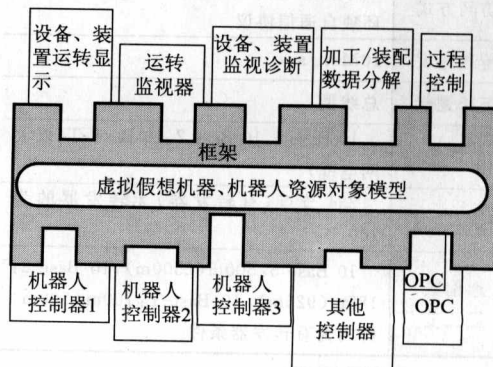
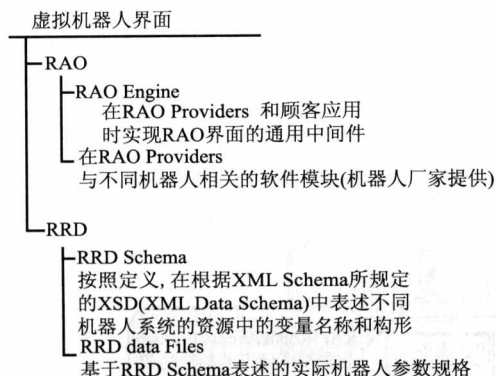
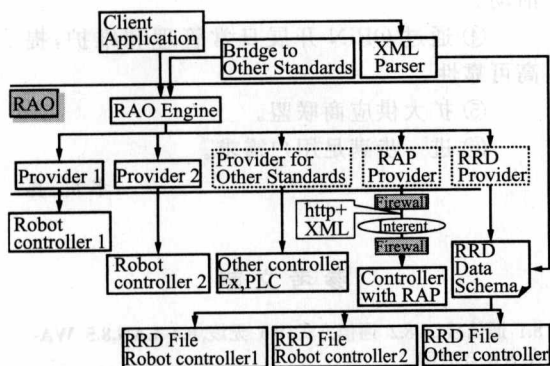


图 8.8 ORiN 的框架和概念



3. 体系结构

ORiN 的体系结构如图 8.10 所示。应用程序通过 RAO(Robot Access Object)访问机器人内部信息,同时参照 RRD(Robot Resource Definition)取得应用程序所必需的参数。



应用的步骤如下:

- ① 用 RRD 描述机器人的固有信息。
- ② 不同机器人的 RAO 对象参照 RRD 由 RAO-Engine 生成。
- ③ 使用模板,通过变量捕捉实体机器人的信息。
- ④ 接受应用程序请求后访问数据。

由此可知,应用程序用户无需了解不同机器人的信息构成和访问方法。

在图 8.10 中,Client Application 能够利用 XML Parser 解释 RRD Schema,取得 RRD File 描述的机器人资源数据。RRD 中的很多数据与 RAO 所处理的信息都是共用的,因此通过以下两条措施,Client Application 即可以

经由 RAO 越过网络直接访问 RRD File:

① 基于不同供应商的 RRD Schema,准备访问被描述数据的 RRD Provider。

② 令 RAO 将访问功能赋予 RRD Provider。

利用 ORiN 能够在应用程序中处理从生产系统传来的信息,实现系统的集成管理和运行。如果欲把 ORiN 标准规格推广到其他领域或其他分布对象技术,只需要调整框架级即可顺利地完成实际安装。在 ORiN 的开发阶段,研究人员十分重视各个公司现有的机器人系统的适用性和早期普及工作,重视已经往 PC 机上实际安装的兼容性,因此它以微软 DCOM 技术为基础,使用 VC++ 进行实际安装。也就是说,为了多数机器人供应商和其他用户使用的方便性,设计 ORiN 时依据了以下方针:①宽松的标准;②可扩展性;③从现状改装的连续性;④规格的研讨和实际安装作业并行。实际安装则基本上都采用国际上 PC 机、网络技术已经流行的技术。

4. 实际安装

完成实际安装的 ORiN 系统模型如图 8.11 所示。ORiN 由 RAO、RRD 及面向供应商的接口组成。供应商把各个公司的机器人控制器在数据表达和协议方面的区别转到内核(kernel)部分处理。在内核部分,RAO 是提供工业机器人标准程序接口的中间件(middle ware),它有 3 个特点:①编程语言的中性;②通信协议的独立性;③网络的透明性。RAO 的客户端应用程序通过 RAO engine 接口访问机器人控制器的内部资源。借助于 RAO,用户或第三方无需考虑机器人供应商或版本的区别,直接开发公共机器人应用软件即可。

RRD 的目的就是跨过机器人供应商,描述不同品牌和机种的机器人资源信息,它采用 W3C 标准 XML Schema 定义数据格式。正因为这一点,ORiN 能够兼容不同型号的机器人,并面向未来应用。

对应于 ORiN 中的 RAO 与机器人控制器之间的通信供应商,实现 RAO 和 RRD 数据访问的模块被称为 RRD Provider。其作用是通过网络就能直接取得存放在 RRD 数据的资源信息。这样一来,经由 RAO 和网络应

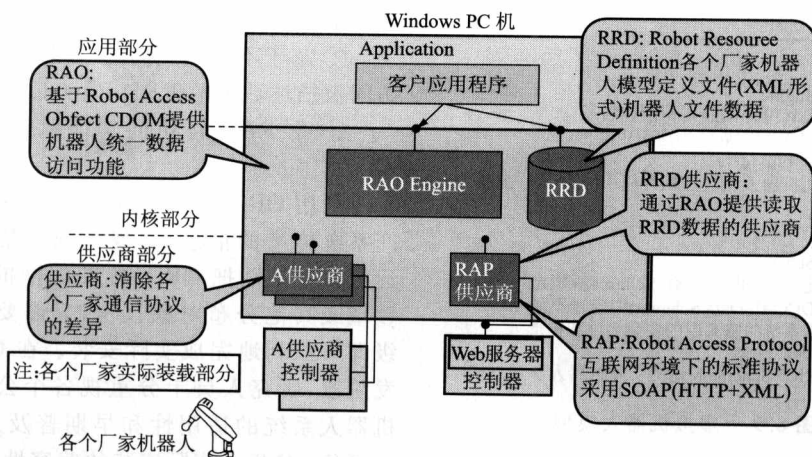


图 8.11 ORiN 系统模型

用程序就能够直接交换数据,不再需要针对 RRD 数据处理制定新的规定了。

RAP(Robot Access Protocol)是一种基于 HTTP+XML 的面向互联网的机器人通信协议,其重点放在网络的透明性上,这对于实现远程维护等服务是十分必要的。基于 RAP 制作的、与 RAO 进行通信的模块被称为 RAP Provider,它被实际安装在 SOAP 上。

在 1999 年、2001 年举办的东京国际机器人展上,展示了主要机器人供应商生产的机器人与各公司开发的 ORiN 应用程序连接的允许效果,公开验证了上述功能的可行性。具体地说,ORiN 能实现下面 6 种应用程序:①移动管理;②生产指示;③3D 状态显示;④文件管理;⑤通过移动电话的状态监视;⑥经过 RAP 的状态显示。RAP Provider 也进行了公开验证实验,机器人实现了有关互联网透明性和其他性能规格的测试动作。

另外,在实际生产线上,RAO 进行了施工管理、文件管理等系统的实际运行实验,证实了它在实际使用环境下功能的完备性和可靠性。至此,ORiN Ver 1.0 版本标准和实际软件开发工作即告完成。关于 ORiN 计划的报告提交给 2001 年 11 月的 ISO TC 184/SC 2 会议。会议主席要求继续进行新标准的提案酝酿。实践证明,ORiN 无论作为机器人,还是作为 FA 设备网络接口都具有极其广泛的适用性。

ORiN 协商会决定今后的工作转向建立“Open Resource interface for the Network/Open Robot interface for the Network”。为此

需要在以下几个方面付出努力:

- ① 扩大应用范围。
- ② 扩大用户。
- ③ 协调其他领域的应用和其他标准化活动。
- ④ 通过 ORiN 开展日常管理和维护,提高可靠性。
- ⑤ 扩大供应商联盟。
- ⑥ 进一步满足用户需求。

水川 真

参考文献

- 8.1 通信接口, 8.2 通信方式, 8.3 无线, 8.4 LAN, 8.5 WAN, 8.6 互联网
- [1] 森本: 通信とネットワークの基礎知識, 昭晃堂 (2002.2)
- [2] コンピュータ/通信/放送標準事典, アスキー出版局 (1998.5)
- [3] 松丸: 通信回線 ISDN を介したロボットの遠隔操作, ロボット学会誌, Vol.17, No 4 (1999) pp.481-485
- [4] 新井, 谷本, 福田: マルチメディア遠隔医療の概念及びカテーテル遠隔操作のための基礎実験, 電気学会論文誌 C, Vol.117, No.5 (1997) pp.500-505
- [5] 情報通信辞典: <http://www.e-words.jp>
- [6] NTT 技術参考資料: ネットサービスのインタフェース第一分冊 (概要編), <http://www.ntt-west.co.jp/shop/isdn/tech/index.html> (<http://www.ntt-east.co.jp/ISDN/tech/spec/topinx.html>)
- [7] NTT 技術参考資料: ATM 概要, <http://www.ntt-west.co.jp/senyo/techpub/techpub 4.html>
- 8.7 内部 LAN
- [1] 元吉伸一: フィールドバス入門, 日刊工業新聞社 (2000)

- [2] 平成12年度 FA の国際標準化事業報告書, (社) 日本機械工業連合会, (財) 製造科学技術センター (2001)
- [3] 旧版ロボット工学ハンドブック, コロナ社 (1990) pp.610-614
- [4] K. L. Paap, M. Dehlwisch and B. Klassen: GMD-Snake: A Semi-Autonomous Snake-like Robot, 3rd International Symposium on Distributed Robotic Systems (DARS '96) (1996); J. Kaiser and M. Mock: Implementing the Real-Time Publisher/Subscriber Model on the Controller
- [5] Area Network (CAN): 2nd Int'l Symposium on Object Oriented Distributed Real-Time Computing Systems (1999)
- [6] CAN 入門書 Rev.4.00 三菱電機 (2004)
- [7] THE I2C-BUS SPECIFICATION VERSION 2.1, Philips Semiconductors (2000)
- [8] 水内, 小屋迫, 稲葉, 井上: シリアルバスを用いたロボット ボディ プロセッサネットワークリモートブレインロボット 春プロジェクト 96: その5ー第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1996) pp.357-358
- [9] 田原, 古田, 清水, 富山: 小型CPUモジュール: Sageを用いたヒューマノイドの実時間制御, 日本機械学会 [No.00-2] ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集 2 A 2-79-106 (2000)
- [10] 古田, 奥村, 富山: 階層制御系実装のための小型ヒューマノイド Mk.5 とそのプラットフォームシステムの開発, 日本機械学会 [No.00-2] ロボティクス・メカトロニクス講演会'00 講演論文集 2 P 1-79-128 (2000)
- [11] 古田, 清水, 田原, 奥村, 戸田, 富山: 小型ヒューマノイド Mk.6 全身行動生成アルゴリズム検証用プラットフォームの構築, 日本機械学会 [No.01-42] ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集 2 A 1-N 3 (2001)
- [12] Cynthia Ferrell: Robust Agent Control of an Autonomous Robot with Many Sensors and Actuators, AI Technical Report 1443 (May 1993)
- [13] 平成12年度 FA オープンネットワークシステム専門委員会成果報告書, FA オープン推進協議会, 財団法人 製造科学技術センター (MSTC) (2001)
- [14] <http://www.jema-net.or.jp/Japanese/hyojun/hyojun.htm>

8.8 通信接口系統描述

- [1] 水川: 次世代産業用ロボットの展望, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1 (1998) pp.41-44
- [2] 水川, 松家, 松元, 小山: 産業用ロボットにおけるネットワークインタフェースの標準化活動ーORiN: Open Robot Interface for the Network, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4 (2000) pp.468-471

第9章 机器人系统设计论

9.1 系统体系结构设计

9.1.1 引言

只有当机器人能够根据周围的状况规划动作时,它的动作才能有机器人真正的做派。为此计算机不可缺少,需要在计算机上安装描述规划机器人行动的程序。此外,需要多种感知外界和内部状况的传感器,再通过驱动器(大多数场合是电机)控制实现机器人动作。对机器人来说,必须建立起一个基于传感器信息的、编制控制程序的计算机环境,以便控制驱动器实现必要的动作。建立控制机器人的计算机环境与建立人们日常办公环境中的计算机环境时所考虑的角度是不同的。在机器人上的计算机,必须考虑机器人特有的各种因素,必须讲究控制计算机有关体系结构方面的设计理论。

在有关的设计理论中,首先要考虑实时性,即在规定的时间内机器人能否完成给定的动作(9.1.2节)。同时,必须考虑实际安装的系统中机器人是一台还是多台?是否有人介入(9.1.3节)?是否使用多个CPU(9.1.4节)?如果在机器人系统的动作描述方面我们能够采用事件驱动的形式,会发现有许多便利之处(9.1.5节),如果是这样,就应该在硬件技术支持形式方面考虑CPU的中断技术(9.1.6节)。在软件安装方面,应该从运行效率和实时性两个方面对操作系统的相关问题做出权衡(9.1.7节)。下面对这些内容分别做一些简单的解说。

9.1.2 机器人系统的实时性和响应时间

机器人系统与日常办公计算机的主要区别是前者必须识别自身周围的环境,根据环境进行动作。环境识别需要各种外界传感器,动作又受到驱动器的控制。控制机器人用的计算机肩负着一系列任务:对传感器信息进行处理、基于处理结果决定动作、对驱动

器实施控制等。面对机器人系统的结构设计,首先需要考虑的问题就是一系列的处理任务应该在多长的时间间隔内完成,换言之,在响应时间内完成,亦即所谓实时性的问题。

以移动机器人为例。假设它属于500mm×500mm的独立2轮驱动配置,在平坦的地面上以500mm/s的速度行驶。再假设它持有行驶环境地图,在已知的当前位置处于静止状态。给定移动目的地后,它必须当场借助于地图进行路径规划,一旦规划完成,即沿所规划的路径开始移动。在沿路径移动的过程中它时刻确认自身是否保持在路径上,如果发生偏离就发出返回到路径上来(路径跟踪)的控制命令。控制是靠调节车轮的转速(驱动轮速度控制)来实现的。此外,它还担负着监视前方的任务,一旦发现障碍物就立即停止(紧急停止)。在设计上述模型时,我们首先需要考虑的问题是上述各个动作应该在多长的时间间隔内完成。

显然,“路径规划”的时间无关紧要。因为这个模型在路径规划的时候还没有启动,无论路径规划耗时多长都不会产生危险。只有负责操纵机器人的操作员(用户)略微感到不大方便。实际上在数秒内完成这个任务就没有任何问题。

其次,需要考虑“路径跟踪”和“驱动轮速度控制”问题。“驱动轮速度控制”必须在极短的时间周期内对行驶速度或期待的加速度实施控制。该过程应该比由机器人质量和惯性力矩决定的机械时间常数快得多,最慢也要在数毫秒内完成,在多数情况下速度控制环(servo loop,伺服环路)的控制周期应该比这更快。“路径跟踪”根据偏离当前目标路径的程度,如果我们在速度控制环内计算机器人返回目标路径的目标速度^[1,2],那么要求执行的时间就应该限制在速度控制环的周期之内。

至于“紧急停止”,则应该由机器人的行

驶速度和减速度来要求传感器发现障碍物的识别时间(处理来自传感器的信号和将送入计算机上的数据符号化所必要的时间),以及监视障碍物的循环扫描间隔来决定。假设机器人以 500mm/s 的速度行驶,并以 250mm/s 的减速度制动,从开始减速到完全停止的距离是 500mm。如果要在 30ms 内识别障碍物,而且每 100ms 循环监视一次障碍物的话,那么只要障碍物传感器能检测出机器人前方距离 600mm 以上的障碍物就足够了。如果有能满足要求的传感器,那么就能每 100ms 巡检一次障碍物,使机器人在障碍物前停下来。

我们发现,即使是这样简单的模型,仍然需要分成多种处理时间间隔,或者说响应时间。例如,在数毫秒的量级内处理速度控制,在 100ms 的量级内处理障碍物监视就可以满足实际应用,而路径规划花费更长的时间也无妨。开发一个机器人,首先要列举与它相关需要处理的事项,以及处理各个事项所必需的循环的时间间隔或响应时间,在此基础上设计一个能满足各种处理时间间隔和响应时间的系统的体系结构。“实时”一词,对不同处理所允许的响应时间不同。在提出机器人系统的体系结构后,除了研究各种处理所要求的响应时间之外,还需要讨论如何评价体系结构的问题。

9.1.3 机器人系统与体系结构

如前所述,对于体系结构的设计来说时间轴是最基本的。另外,其实空间轴,即针对机器人系统所设想的空间的广度也是重要的。比如,可以包括如下事项:

- ① 该机器人是否为单独系统。
- ② 是否有多台机器人组成以某种形式彼此协调的系统。
- ③ 系统是否有单台或多台机器人与各种底层支持设备之间需要通信和协调。
- ④ 系统是否要求人机交互。

所谓空间的广度,实际上所涉及的问题是决定机器人或系统的作业方式,以及开展设计的空间范围。需要注意的是,当多台机器人彼此之间,或与人之间,或与底层设备之间必须留有通信信道时,如何确保通信信道是设计上的一大关键。即使是单台机器人的

内部通信,传感器和驱动器的信号,以及在内部流通的信息均在机器人内部交互,同样必须关注通信问题。即便在安装机器人内部 CPU 的软件时,它们被分割成若干个适当处理的单位做多进程或多线程并行处理,进程与线程之间的信息交换也就是通信。通信信道的带宽始终是机器人系统体系结构设计上的一大关键。显然,在通信信道上信息的通信速度与上述的系统响应时间有密切的关系。

9.1.4 集中 CPU 和分布 CPU

如果从计算机所能配置的资源来考虑,存在着选择一个 CPU 还是多个 CPU 提供机器人系统的计算机资源的问题。由此可以区分出计算机(\approx 控制器)的集中 CPU 或分布 CPU。

系统有多个 CPU 的场合,它们承担的计算任务又可以分为同构(homogeneous)或异构(heterogeneous)。前者相当于搭载双 CPU,让计算资源全部集中在 CPU 的主板上,后者则相当于用不同 CPU 负担机器人的不同功能(视觉、超声波传感器、判定、驱动器控制等),即各个 CPU 对应不同的功能完成特定计算。

同构的分布 CPU 方式,各个 CPU 之间的通信尤其不可缺少。至于选择物理通信媒介的问题则需要慎重对待。经由分布式 CPU 之间的通信路径的信息单位既有约数百字节的 ASCII 文字序列,又有高达数兆字节的图像数据,应该采取多大的传输速率,即通信信道的带宽,毕竟是一个大问题。

至于 CPU 的分布方式,有时 CPU 之间的通信速率很低就能将就了,有时则不能将就。总之,分布方式不一而足。

其他该选择的项目还包括主导权问题。各个 CPU 或者取通信方向和主导权彼此平等,或者平时总赋予一个 CPU 主导权。还有一种选择我们很容易理解,例如,各个 CPU 之间的通信是采用 IEEE1394 标准实现呢,抑或采用 USB 标准实现? IEEE1394 中每个分布 CPU 都可能成为总线主控制器,而 USB 中具有总线主控制器功能的 CPU 经常是被事先指定的。

9.1.5 事件驱动的机器人动作决定的支持

在 9.1.2 节引用的例子中,我们可以把移动机器人在行驶中发现前方障碍物的情景想象成一个事件。对移动机器人来说,类似这样的事件不仅有“发现障碍物”,还有“到达十字路”、“碰撞传感器检测到接触”、“从路标旁经过”等。这些事件往往会不定期、非同步地出现,需要根据不同事件采取不同对策。在根据事件规定机器人动作的层级,即行动层上进行编程,从本质上说是用事件驱动(event driven)形式对行动进行描述。因此,在机器人系统的体系结构上构建这种形式描述的机器人行动的框架是合适的。

为了监测事件的发生,可以配备起监视(轮询)作用的专用 CPU,或者是让监视进程常驻在某一个 CPU 上。无论如何,一旦有事件发生,必须向具有处理功能的 CPU,或者进程,或者说向正处于运行中的上述“行动层”的程序的进程通报事件的发生。是否通知,以及系统传输的速度是否能满足要求,是机器人系统体系结构设计上的一个关键点。

9.1.6 事件驱动处理和中断

以移动机器人为例,假设当所有事件发生(如碰撞传感器检测接触到障碍物,检测到地板色标,接近觉传感器感知到附近的障碍物等)后,发送相应信号的硬件已经齐备。那么会常常使用中断的方式通知计算机(CPU)事件发生了。9.1.2 节的例子给出了周期性处理中断的方法,比如,为了监视驱动器伺服和障碍物,可以在硬件上配备定时器,周期地进行中断。如果需要多种不同周期时,当然定时器就应该产生不同的中断周期。执行串行通信或磁盘设备的读写也需要从相关的控制硬件发出中断申请。在一般的系统中,非周期性或周期性发生的中断源往往混杂在一起。这就对软件提出较高的要求,甚至在多个中断源同时发出中断申请时也不会出现任何问题。为了尽快找出中断源,及早处理中断的相关事宜,总是希望 CPU 带有的中断信号输入线多一些,每个中断处理都能对应着独立的中断输入。

在这里,我们从中断的角度对采用 86 系

列 CPU 的台式计算机和作为嵌入式计算机广泛应用的 SH2 系列的 CPU 做一个简单的比较(图 9.1)。

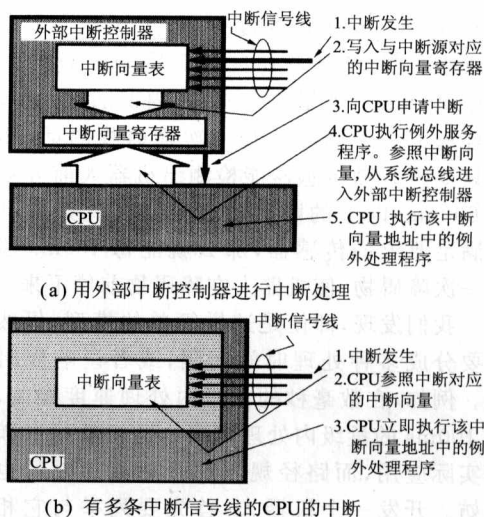


图 9.1 中断的处理

86 系列 CPU 的中断输入信号端子有两个。在 486CPU 或早期 Pentium CPU 中,这两个中断输入分为可屏蔽中断(INTR)和不可屏蔽中断(NMI)。最新 Pentium 既可以选择与此相同的中断,也可以选择对内置的高级可编程中断控制器(APIC)进行 2 位输入。86 系列 CPU 对应多个中断源的一个措施是在外部配备中断控制器(如 8259),该控制器的输出被接到 CPU 的 INTR 输入端子。中断控制器负责接收中断源引发的中断,然后把信号输出到 CPU 的 INTR 端子。然后 CPU 暂停执行当前的处理,从系统总线上参照中断控制器的寄存器,读取其中所记录的与中断源相应的处理程序的地址,并开始执行该程序^[3]。

相比之下,统称为 SH2 的 SH-7040 系列 CPU 中的中断控制器(INTC)可以提供 9 类(根据嵌入的 A-D 通道数可以有 43~44 个中断源)CPU 内部周边设备中断、9 个外部中断信号,以及 1 个用户中断。这样,中断源就能达到 53~54 个。它们均被视为独立中断。对应于中断源的中断例外向量事先在 CPU 内部就已经被定义好,一旦有中断进入即可立即跳转到它所对应的中断处理的程序。

也就是说,在 86 系列的 CPU 中,一旦有

中断进入,首先参照中断控制器的状态寄存器确定该中断源的程序(例外服务程序),然后跳转到相应的中断处理程序(例外处理程序)。与此相反,在 SH2 中,中断进入后就立刻启动例外处理程序。与 86 系列 CPU 相比,SH2 中断处理的开销少,这种设计主要面向来自硬件的中断源较多的设备。顺便说一下,文献[4]对 SH2 的中断响应时间有明确说明,在 28.7MHz 下运行,外部中断的响应时间最快高达 $0.70\mu\text{s}$ 。这个速度对 1ms 为周期的定时器中断来说是非常快的。在 SH2 中有 5 个充当周边设备的定时器(MTU),由于 MTU 的功能也很丰富,所以容易产生多个周期的中断信号。

考虑系统体系结构时,决定采用何种 CPU 内核的又一个必须考虑的问题是如何设计硬件中断的处理方法。当然,CPU 的耗电以及是否将驱动定时器和串行通信等周边设备的功能嵌入 CPU 内部等问题同样也是 CPU 选择上的重要考察点。

9.1.7 开发环境和 OS,软件结构的实现

无论机器人系统体系结构如何设计,最终必须既有硬件又有软件。如果软件开发环境方便好用,显然它对整个系统的开发是有利的。机器人系统如果能在支持多任务的 OS 上,把它按照执行单位分割成若干个进程独立运行,这会大大提高开发效率。人们公认这种形式的 OS 的稳定性较高,使用“调零”的 OS 会提高系统的稳定性。

不过,机器人系统中的 OS,即便是支持多任务的 OS,也希望选择所谓的实时 OS(RTOS)。RTOS 的详细定义请看其他书(如文献[5,7]),概略地说应该满足以下 3 点:①不引起任务优先级翻转;②快速执行任务切换;③对中断反应速度快。图 9.2 解释了“任务优先级翻转”^[6]的具体含义。假设 OS 上有任务 A、B、C 正在被运行。由于最低优先级任务 C 等待运行结果的缘故,最高优先级任务 A 的处理被搁置起来,而中间优先级任务 B 被执行,结果 C 也被搁置,最终在轮到任务 A 的指派前,最高优先级 A 的处理就不会有任何进展,尽管 B 的优先级比 A 低,它涉及的处理却被执行,这就是“优先级翻转”。

作为设计的常识,应该在 RTOS 中能自动检查到这个现象,让 C 的优先级提高(优先级继承),在结果上使 A 的处理进程加快。

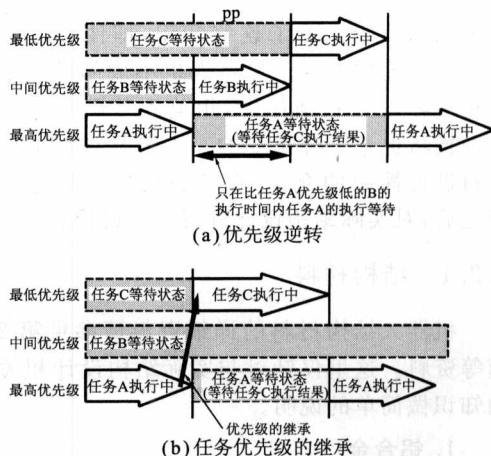


图 9.2 任务优先级的翻转和继承

9.1.8 机器人系统体系结构举例

有多少机器人系统就有多少系统体系结构,这话并不为过。实际上人们已经提出了各种各样的构成系统的方法。举个例子,文献[8]提出将机器人躯体(body)和脑(brain)从物理上分离,它们之间借助于协议通信,这也属于一种体系结构,叫做 remote brain approach。再如,把移动机器人(或其他机器人)用无线 LAN 连接的整个环境考虑成机器人系统的体系结构,用 LAN 连接各种智能体实现各种功能^[9]。还有一种体系结构,每个机器人把必要的功能都分派给一个 CPU 管理,其间靠通信协同^[10]。文献[11]的作者在对移动机器人分布式功能结构研究的基础上,正在尝试把相同概念的软件移植到通用 PC 机上。此外,还有人建议把工业设备控制 LAN 中的 ARCNet 移植到机器人控制中,例如,已经有 NOMAD 移动机器人、三菱重工 PA10 等应用实例。有的研究人员还在尝试用硬件来实现机器人系统通信反应速度。其具体办法是用 SPARC 芯片作内核 CPU,将周边接口与内核心 CPU 制作在同一块芯片上,即所谓的片内级(on chip)的 responsive processor^[12]。

坪内孝司

9.2 结构设计

在本书第2篇中,对机器人制作必不可少的传感器、驱动器、动力源、机构、材料等做了详细的解说。有了这些知识,即使开发拟人机器人这样的复杂机器人也不成问题。不过在实际设计和制作中,相关的基础知识和各种技巧也是十分重要的。本节打算对结构材料进行简单的介绍,在掌握机器人设计基础之后,对实际结构设计进行一些讨论。

9.2.1 结构材料

机器人结构材料的详细资料请参见第2篇等资料。这里仅针对与实际结构设计相关的知识做简单的说明。

1. 铝合金

铝合金的密度小,是铁的 $1/3$ ($2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),而且其加工性好,所以被广泛用作机器人结构材料。铝合金分成轧制材料和铸造材料。轧制材料用于机器人样机试制,铸造材料用于批量生产。

根据特性,铝合金轧制材料又可以分为耐腐蚀合金(1000系列、3000系列、5000系列、6000系列),耐热合金(2000系列、4000系列),高强度合金(2000系列、7000系列)等^[1]。机器人结构材料经常使用2017(硬铝)、2024(超硬铝),它们的强度能与钢材匹敌,具有优良的耐腐蚀性的5052、5056,铝合金6063和铝合金中强度最高的7075(超高硬铝)经常用于槽型、角型、方管型等压铸型材。

不过,高强度合金2000系列和7000系列的耐腐蚀性较差,所以使用前需要经过极性阳极化处理,以提高它们的耐腐蚀性和耐磨性。

2. 不锈钢

铬成分占12%以上的铁-铬合金称为不锈钢(stainless steel)^[1]。加入铬元素后,合金的耐腐蚀性比纯铁有显著增加。按金属组织进行分类,不锈钢有铁素体系列、奥氏体系列、马氏体系列等几类。机器人设计中各个关节轴要求较高的强度,所以对轴材料的需求较多,不锈钢的密度高($7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),在相同强度下其重量比铝合金、镁合金重,所以用它来充当机器人的全部材料是不划算

的。经常使用的不锈钢是奥氏体 SUS304 和切削性好的 SUS303 等。

3. 镁合金

镁(magnesium)的密度是铁的 $1/4.5$ ($1.71 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),属于金属材料中最轻的一类。在它中通常加入铝、锌成分做成合金使用。镁合金的比刚性(弹性率/密度)和比强度(拉伸强度/密度)高,不过在制造成本、防锈处理方法、劳动安全性等方面存在一些问题,故迄今还很少被使用。但近年来,它在MD随身听、笔记本电脑等的机壳中得到普遍使用。与此同时,有关它的新成型方法也不断被开发出来^[2],所以它的应用变得越来越引人注目。例如,本田技研工业的拟人机器人P3、ASIMO等是机器人使用镁合金的例子^[3,4]。

经常使用的镁合金有铸造材料AZ91D、轧制材料AZ31B等^[2]。AZ表示Al-Zn合金,后面的31等数字表示Al占有3%,Zn占有1%。数字后的字母表示杂质的容许程度^[1]。

4. 纤维强化树脂

将轻质树脂与纤维强化材料进行复合,可以收到比强度、比刚性同时大幅度提高的效果。树脂有热硬性、热塑性之分,分别称为FRP(Fiber Reinforced Plastics)和FRTP(Fiber Reinforced Thermo-Plastics)。

热硬性树脂又分为UP、EP、PF、PI等^[6],玻璃纤维GFRP、碳素纤维CFRP经常被用作纤维强化材料。不过,因为成型后加工困难,所以纤维强化材料在多数场合的使用效果有限。

5. 结构材料的比较

上面对铝合金、不锈钢、镁合金、纤维强化树脂等做了简单的介绍。这里对各种结构材料的比强度(拉伸强度/密度)进行比较。有些文献对比强度有另外的定义(拉伸强度/密度),为了让单位更明确,这里采用比强度(拉伸强度/密度)表示。

比强度越高,相同质量条件下得到的强度也越高。反之,为了得到相同的强度,比强度高的结构材料能够做得更轻。

表9.1中比较了铝合金、不锈钢、镁合金中典型结构材料的机械性质。这里关于密度和拉伸强度的资料参考了文献[1],而作者在

上述数据的基础上对比强度进行了计算。各个合金末尾的记号称为热处理记号, F表示保持加工原状, H表示非热处理, T表示热处理。T6代表最高强度。

表 9.1 中的 AC1A、AZ91C 是铸造材料, 5052、2017、7075、AZ61A 是轧制材料。如果对铸造材料的铝合金和镁合金做一个比较, 一般来说, 镁合金显示出更高的比强度。不过轧制的硬铝合金系列材料持有较高的比强度, 因此硬铝被广泛地应用为飞机材料。不锈钢的比强度低于铝合金和镁合金。

表 9.1 结构材料的比较

结构材料	相对密度	拉伸强度/MPa	比强度/MPa
铝合金			
AC1A-T6	2.7	329	121.85
5052-H38	2.7	289	107.04
2017-T4	2.8	427	152.50
7075-T6	2.8	574	205.00
不锈钢			
SUS304	7.9	569	72.03
SUS420	7.8	640	82.05
镁合金			
AZ91C-T6	1.8	275	152.78
AZ61A-F	1.8	310	172.22

加入不同树脂和纤维强化材料后的纤维强化树脂在机械性能方面呈现出千差万别, 所以不能与金属材料做简单比较, 不过比强度高的纤维强化树脂可以达到高强度铝合金的 5~6 倍^[6]。高比强度金属材料还有钛合金等, 它的价格高, 一般不用于机器人结构材料。

9.2.2 结构设计基础

1. 结构剖面的设计

机器人手臂、腿部等最简单的结构模型是无质量梁。虽然它们实际上是属于分布质量, 不过在机器人中与电机、减速器比较起来, 在多数场合它们的杆件质量都很轻, 如果将电机等视为集中质量, 将杆件视为无质量梁建模, 一般也能得到相当近似的结果。在精密结构分析前的初步设计阶段, 这样的简化模型已经够用了。

作为例子, 我们来考虑最简单的自由端承受集中载荷 P 的无质量梁。设计机器人时, 一个设计指标就是将手臂或腿部简化成这样的简单悬臂梁模型, 设定最大力作用在前端, 校核梁内所产生的最大应力是否超过结构材料的许用应力。

如图 9.3 所示, 弯矩造成梁的弯曲变形后, 梁剖面的上部受拉伸使纤维延展, 下部受压缩使纤维收缩。在梁的中间某处存在一个纤维长度不变层, 称为中性层。把中性层和剖面的交线叫做中性轴 (neutral axis of the beam), 在图 9.4 所示的梁剖面图中, x 轴称为中性轴 (若受横向力, 则 y 轴是中性轴)。在产生弯矩 M 的剖面中, 距离中性轴 y 的纤维发生的应力 σ_z 用下式表示:

$$\sigma_z = \frac{M_y}{I} \quad (9.1)$$

式中, I 为剖面的惯性矩 (moment of inertia), 是梁剖面上微小区域与离开中性轴距离的平方的乘积在剖面整体上的积分所得到的值, 用下式表示:

$$I = \int_A y^2 dA \quad (9.2)$$

式中, y 为中性轴到微小区域的距离。若结构的剖面相对于中性轴对称, 则作用在中性轴周围的弯矩所产生的拉伸、压缩的最大纤维应力相等, 而且都出现在离中性线最远的纤维处。最大应力 σ_{\max} 由中性线到最外侧的纤维

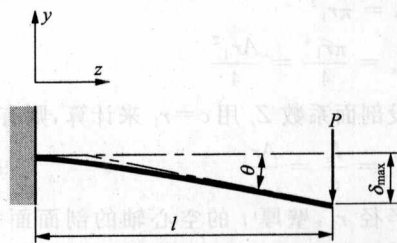


图 9.3 自由端承受集中载荷的悬臂梁

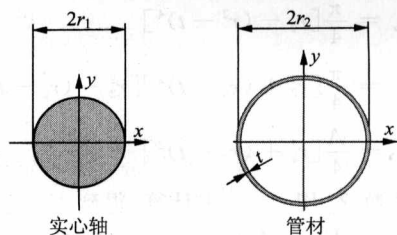


图 9.4 悬臂梁的剖面形状

维的距离 c 、弯矩 M 、惯性矩 I 按下式表达:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z}, \quad Z = \frac{I}{c} \quad (9.3)$$

式中, Z 为剖面系数(section modulus)^[7]。设计受弯曲的结构时, 决定剖面系数 Z 的原则是不让工作应力(working stress)超过上述的 σ_{\max} 。

设计时通常不应该让工作应力超过结构材料的弹性比例极限(proportional limit)。不过, 正确测定结构材料的比例极限很难, 故工作应力 σ_w 一般用结构材料的屈服应力(yield stress) $\sigma_{y.p.}$ 或强度极限(ultimate strength) σ_{ult} 按下式计算:

$$\sigma_w = \frac{\sigma_{y.p.}}{n} \text{ 或 } \sigma_w = \frac{\sigma_{ult}}{n}$$

一般非铁金属的屈服现象不大明显, 故用弹性强度(proof strength)取代屈服点。弹性强度是施加某个应力, 待除去它后, 长度未能恢复原样而产生 0.2% 的永久伸长所对应的应力。此外, n 被称为安全系数(factor of safety)。依照文献^[7], 受到冲击载荷或变动载荷时安全系数的值都应该 >2 。

决定剖面系数 Z 后, 需要再决定实现该值的剖面形状。在剖面系数相同的条件下, 面积小的剖面形状能减轻质量。

我们来看图 9.4 所示的梁剖面形状, 考察一下实心轴和空心轴的剖面系数。图 9.4 中半径为 r_1 的实心轴的剖面面积 A 对 x 轴的惯性矩 I_x 为:

$$A = \pi r_1^2$$

$$I_x = \frac{\pi r_1^4}{4} = \frac{A r_1^2}{4}$$

设剖面系数 Z_s 用 $c=r_1$ 来计算, 则有

$$Z_s = \frac{I_x}{c} = \frac{A r_1^2}{4} \quad (9.4)$$

再看半径 r_2 , 壁厚 t 的空心轴的剖面面积 A 对 x 轴的惯性矩 I_x 为:

$$A = \pi[r_2^2 - (r_2 - t)^2]$$

$$I_x = \frac{\pi}{4}[r_2^4 - (r_2 - t)^4]$$

$$= \frac{\pi}{4}[r_2^2 + (r_2 - t)^2][r_2^2 - (r_2 - t)^2]$$

$$= \frac{A}{4}[r_2^2 + (r_2 - t)^2]$$

剖面系数 Z_p 用 $c=r_2$ 来计算, 得到

$$Z_p = \frac{I_x}{c} = \frac{A}{4} \left(2r_2 - 2t + \frac{t^2}{r_2} \right) \quad (9.5)$$

具有相同截面积 A 的实心轴和空心轴, 此时半径 r_2 和 r_1 的关系为

$$r_2 = \frac{r_1^2 + t^2}{2t} \quad (9.6)$$

把式(9.6)代入式(9.5)中, 再用式(9.4)求 $Z_p - Z_s$, 得到

$$Z_p - Z_s = \frac{A}{4} \left(\frac{r_1^2 + t^2}{t} - 2t + \frac{2t^3}{r_1^2 + t^2} - r_1 \right)$$

$$= \frac{A(r_1 - t)(r_1^3 - t^3)}{4t(r_1^2 + t^2)} > 0 \quad (9.7)$$

因为 $r_1 > t > 0$, 故空心轴的剖面系数 Z_p 总是比实心轴的剖面系数 Z_s 大。由式(9.3)可知, Z 越大, 最大纤维应力越小, 因此在截面积相同的条件下, 空心轴能够比实心轴承受更大的弯矩; 或者反过来, 在剖面系数相同的条件下, 空心轴的截面积越小, 其质量越轻。

用一个具体的数值来进行验证。设实心轴半径 r_1 为 10mm, 剖面系数 Z 和截面积 A 分别是 $Z=250\pi(\text{mm}^3)$, $A=100\pi(\text{mm}^2)$ 。另外, 壁厚 $t=1\text{mm}$ 的空心轴如果要得到同样的剖面系数, 半径 r_2 约为 16.548mm, 此时截面积 $A=32.096\pi(\text{mm}^2)$, 即用空心轴代替实心轴, 直径变成约 1.65 倍, 整体质量减到约 1/3, 可见在减轻质量方面的成效是显著的。

为了以相同的截面积得到更大的剖面系数, 结构材料应该尽可能地放在远离中性轴的位置。在这个意义上, 如果仅承受 x 轴的弯矩, 那么工字形截面是很理想的; 如果是承受 x 轴和 y 轴两个方向的弯矩, 那么矩形空心截面是理想的形状。考虑图 9.5 所示的壁厚 t 、长和高各为 d 的矩形空心结构和工字形结构。

工字形结构的截面积为 A , 对 x 轴、 y 轴的惯性矩 I_x 、 I_y 分别是

$$A = 3bt - 2t^2$$

$$I_x = \frac{b^4}{12} - \frac{(b-t)(b-2t)^3}{12}$$

$$I_y = \frac{2tb^3}{12} + \frac{(b-2t)t^3}{12}$$

再看矩形空心截面积为 A , 以及对 x 轴、 y 轴的惯性矩为 I_x 、 I_y 是

$$A = 4bt - 4t^2$$

$$I_x = I_y = \frac{b^4}{12} - \frac{(b-2t)^4}{12}$$

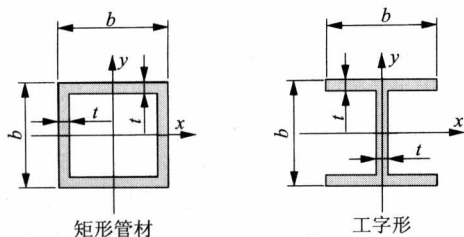


图 9.5 矩形空心结构和工字形结构

在两个结构中从中性线到最外侧纤维的距离 c , 都是 $c=b/2$ 。

用一组具体数值来进行验证。两个结构均以壁厚 $t=1\text{mm}$, 宽和高 $b=10\text{mm}$ 来进行计算。工字形结构的截面积为 A , 对 x 轴、 y 轴的惯性矩 I_x 、 I_y , 剖面系数 Z_x 、 Z_y 分别是 $A=28\text{mm}^2$, $I_x=449.33\text{mm}^4$, $I_y=167.33\text{mm}^4$, $Z_x=89.866\text{mm}^3$, $Z_y=33.466\text{mm}^3$ 。相比之下, 矩形空心结构对应的数据分别是 $A=36\text{mm}^2$, $I_x=I_y=492\text{mm}^4$, $Z_x=Z_y=98.4\text{mm}^3$ 。

如果剖面系数分别用各自的截面积和高的乘积 Ab 表示, 那么工字形结构是 $Z_x \approx 0.321Ab(\text{mm}^3)$, $Z_y \approx 0.120Ab(\text{mm}^3)$, 矩形空心是 $Z_x=Z_y \approx 0.273Ab(\text{mm}^3)$ 。这就是说, 在截面积相同的条件下, 若仅承受 x 轴方向的弯矩, 工字形结构比较经济。但若同时在 y 轴方向也承受弯矩, 那么工字形结构就不合适。

2. 结构刚性

在上述 1 中对剖面形状与纤维应力的关系进行了讨论, 就应该如何设计剖面形状防止梁的最大应力超过结构材料的许用应力的方法做了讲解。显然满足该强度条件是必要的。不过, 有时需要把手臂或脚部的前端弯曲变形限制在一定值以下。面对这样的设计要求, 就应该针对结构的刚性进行设计。

如图 9.3 所示, 无质量悬臂梁的自由端承受载荷 P 时的弯曲量用 δ_{\max} 表示, 挠曲角用 θ 表示。此时, δ_{\max} 和 θ 如下式计算:

$$\delta_{\max} = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (9.8)$$

$$\theta = \frac{Pl^2}{2EI} \quad (9.9)$$

式中, E 为结构材料的纵向弹性模量(modulus of longitudinal elasticity); I 为悬臂梁的惯性矩; EI 为抗弯刚度(flexural rigidity)^[7]。由

式(9.8)和式(9.9)可知, 结构的抗弯刚度越大, 在承受相同力的条件下变形量越小。应该根据给定载荷所造成的变形量的设计值限制, 求出抗弯刚度进而决定剖面形状。

抗弯刚度是惯性矩和结构材料的纵向弹性模量之积。结构材料的纵向弹性模量有一些应该注意的地方。不锈钢的纵向弹性模量约为 199GPa, 铝合金轧制材料的纵向弹性模量为 69~74GPa, 镁合金的纵向弹性模量约为 45GPa。各种材料的纵向弹性模量除以密度所得的值, 基本上都是 25~26GPa, 彼此差别不大。为了得到相同的抗弯刚度, 如果使用纵向弹性模量低材料, 那么与其选纵向弹性模量高的材料, 不如采取增大壁厚等措施来提高惯性矩。

3. 骨骼结构

机器人的骨骼结构大致分为外骨骼型和内骨骼型。

外骨骼结构有两个优点: 第一个是若骨骼剖面设计得相同, 就如在前面 1. 所验证的那样, 一般来说它比内骨骼型的剖面系数大, 因此能承受更大的弯矩。反之, 如果取剖面系数一致, 那么截面积一般可以比内骨骼型小, 也就是轻。第二个是电机、线材、计算机、功率放大器, 以及其他电子设备都能收容到骨骼结构的内部, 当发生与外部环境接触时这些器件能够得到保护。

再来看内骨骼结构, 它的优点是不必拆卸骨骼结构就能检修电机、电子器件, 就是说可维护性较好^[3]。在制作上它比外骨骼型方便。如果与外骨骼结构做刚性比较, 在相同截面积条件下它的刚性较低, 但若把剖面形状设计成工字形就能得到足够的刚性。不过正如在 1. 中所述, 工字形的剖面系数的高低有方向的选择性, 因此要注意使用的方向。

外骨骼结构剖面的形状可以取圆形和矩形两种形式, 矩形在剖面系数上有利, 一般来说制作也比较容易, 维护性好。图 9.6 给出剖面形状做成矩形的外骨骼结构的例子。图 9.6 所示的结构如能固定天板、底板、侧板即可保持形状, 拆去前面板或背面板后即可进行维修。如果在结构上难以构成天板或底板, 可以插入中板作为加强板。

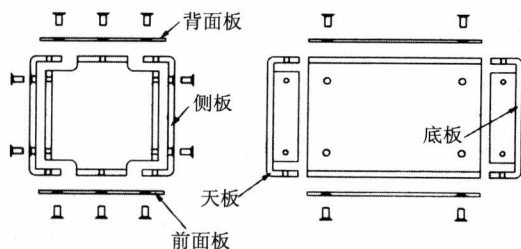


图 9.6 外骨骼型结构的例子

图 9.6 属于组合梁结构,应该首先作为一个梁整体决定剖面系数,然后以结合部分的剪切应力来计算螺钉的间隔距离。详细内容可以参照材料力学的教科书(例如,文献[7]中的 5.6 节)。

要制作“U”字形状的构件有三种途径:①将两侧边折弯;②利用机械加工把具有一定厚度板料的中间部分挖空;③使用“U”字形或“口”形的压铸型材。图 9.6 将板材的两侧边折弯后在该部分上打出螺孔,用螺钉固定。如果板材很薄,无法打出螺孔,可以压入螺母后设法固定(图 9.7)。通常螺母可以压入板厚 0.8mm 以上的板材。

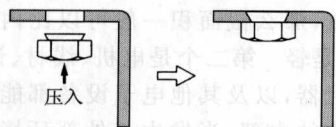


图 9.7 压入螺母的使用例子

4. 结构材料的选定

虽然在比刚性、比强度上纤维强化塑料有优势,但是如果全部材料都用纤维强化塑料来制作,在成本上是不合算的。在机器人制作中,通常重要的承载轴选用不锈钢 SUS303 等材料,骨骼部位选用镁合金或纤维强化塑料,强度要求不高的部位可以分别选高强度铝合金 5052、5056、工程塑料等。

选什么结构材料,涉及成本和质量这两个目标,所以应该视情况而定。原则是既不付出过高的成本,又能满足质量的要求。目前,最通常的办法是根据强度区分选用不同的铝合金材料。

5. 减速器机构设计

减速机构设计中最值得注意的是齿轮齿隙。直齿轮和行星齿轮的减速会产生较大的问题。机器人大多靠调整齿轮轴间距的办法

来消除齿隙,不过齿轮动力传递还是需要合适的齿隙的,齿隙过小会增加齿轮的磨损。

因此,在减速器的最后一级,可以选用谐波齿轮或钢丝绳等齿隙较小的传动方式进行减速。即使输入级存在或多或少的的问题,由于在减速的最后一级,问题将被减小到减速比的分量。不过,从市场上买回谐波齿轮后,如果仅靠螺钉将其柔轮固定的话它往往无法承受大的负载,会产生滑动。有些应用场合应该制作专门的销孔,借助于销轴来进行定位。

6. 其他

机器人设计中容易被忽视的问题是螺钉松动。为了防止螺钉松动,原则上是根据负载选用足够尺寸的螺钉,并给予一定的预紧力。实际上,依靠螺钉防松黏着剂,也能在一定程度上防止螺钉松动。

9.2.3 实际结构设计

拟人机器人“才华”^[38]的外观如图 9.8 所示,各个关节的位置如图 9.9 所示。这里以“才华 3”为例就性能规格的决定直至实际结构设计的有关内容进行一些说明。

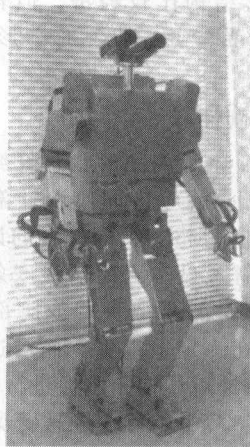


图 9.8 拟人机器人“才华 3”(东北大学)

1. 设计流程

设计机器人最初要做的事情就是决定性能规格。如大体尺寸、总质量估算、固定式或移动式、控制器是搭载式或分离式、自由度数和配置等。此外,也涉及经费预算。性能规格决定后,机器人的雏形就有了。

性能规格解决后进入驱动器和减速器的

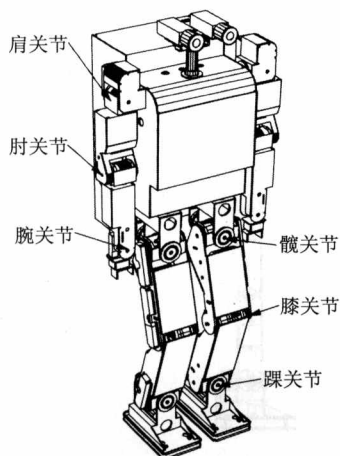


图 9.9 “才华 3”各个关节的位置

选定。通常选择市售的驱动器和减速器,如果市售产品无法满足性能规格的要求,那么就要在开发新驱动器和减速器,或者是修改性能规格两者之间做出选择。完成这一步之后就进入结构设计和结构材料的选择,以及电子设备的选择等详细设计阶段。

2. 性能规格的决定

拟人机器人“才华 3”的自由度组成是:头部 2 个自由度、单手臂 7 个自由度、手部 2 个自由度(每只手各 1 个)、单腿 6 个自由度,合计共 30 个自由度。图 9.10 给出自由度的配置情况。1#~3#,7#~9# 对应图 9.9 的髋关节,4#、10# 对应膝关节,5#、6#、11#、12# 对应踝关节,13#~15#、21#~23# 对应肩关节,16#、17#、24#、25# 对应手部关节。

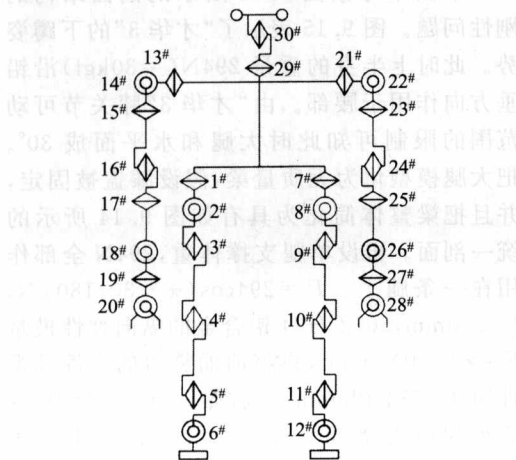


图 9.10 “才华 3”的自由度配置

选定体内搭载计算机和电池的自主移动系统。动作命令由外部机站经过无线 LAN 发送到体内计算机上。

“才华 3”身高 1.3m、总质量约 50kg。这样不仅为拟人机器人利用社会已有的基础设施提供了方便,而且容易操作、无恐惧感。至此尺寸问题基本已决定。至于质量,估计包括手臂在内的上半躯体的质量总计约为 30kg,由此选择脚关节所需的力矩、电机和减速器。

3. 腿部驱动器的选择

性能规格决定后即可进入驱动器和减速器的选择阶段。此时,如果有动力学仿真结果,那么关节力矩的估算就简单多了。

研究表明,通常 2 足步行机器人膝关节承受的负载最大。图 9.11 和图 9.12 分别举例说明依据性能规格提供的参数获得的膝盖屈伸动作仿真结果和右腿膝关节的转矩时间历程。图 9.11 还用 CAD 模型来表示拟人机器人“才华 3”的膝关节屈伸动作,不过仿真时实际依据的是集中质量的简易杆件模型。由图 9.12 可见,动作瞬间峰值转矩约为 $45\text{N}\cdot\text{m}$,最大屈曲时约为 $35\text{N}\cdot\text{m}$,膝盖保持略有弯曲的站立姿势时约为 $10\text{N}\cdot\text{m}$ 。

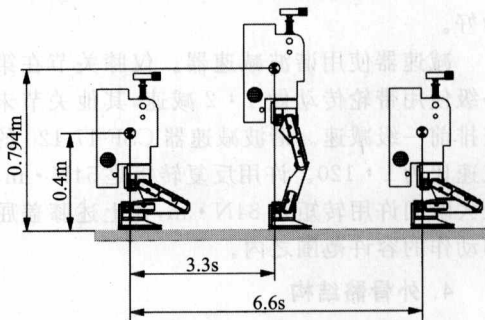


图 9.11 膝盖屈伸动作仿真

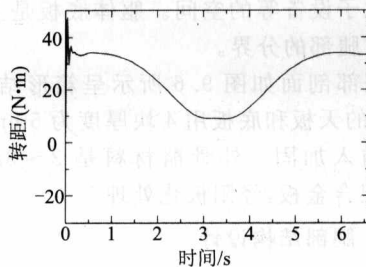


图 9.12 膝盖屈伸动作时膝关节转矩

若选 Maxon Motor 公司的直流电机 RE35(额定功率 90W),额定电压 30V 的话,最大连续转矩达到 $0.107\text{N}\cdot\text{m}$,堵转转矩为 $0.949\text{N}\cdot\text{m}$ 。这里的最大连续力矩是指在推荐运转区间内,堵转转矩~最大连续转矩范围内短时间运转可以达到的值。再选谐波传动齿轮的减速比为 $1:120$,前一级带轮减速比为 $1:2$,于是总减速比达到 $1:240$ 。若谐波传动齿轮的效率为 0.75 ,对应的最大连续转矩和堵转转矩分别是 $19.26\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $170.82\text{N}\cdot\text{m}$ 。这里还应该考虑带轮和带传动的效率。当然,我们也可以选择功率比 RE35 更高的电机,但是既然堵转转矩已经足够大了,而且最大屈曲姿势仅在瞬间发生,RE35 也就足够了。步行仿真中膝关节的峰值转矩通常不会超过 $25\text{N}\cdot\text{m}$ 上下。

最后,“才华 3”上 1# 和 7#(图 9.10)驱动器选用 Maxon Motor 公司额定功率 20W 的直流电机 RE25,2#~6#,8#~12# 选用额定功率 90W 的 RE35。由于设计时未能从市场上订购到 RE35 电机,故改用比 RE35 稍大一号的 RE40。RE40(额定功率 150W)在额定电压 30V 下的最大连续转矩为 $0.181\text{N}\cdot\text{m}$,堵转转矩为 $2.290\text{N}\cdot\text{m}$,是 RE35 的 2 倍以上。若今后遇到类似设计,膝关节仍用 RE40 为好。

减速器使用谐波减速器。仅膝关节在第一级使用带轮传动做 $1:2$ 减速,其他关节未安排前一级减速。谐波减速器 CSF-17-120 的减速比为 $1:120$ 。许用反复转矩是 $54\text{N}\cdot\text{m}$,最大瞬间许用转矩是 $84\text{N}\cdot\text{m}$,在上述膝盖屈伸动作的容许范围之内。

4. 外骨骼结构

图 9.13 给出“才华 3”的侧剖面图。粗线表示的部分属于外骨骼结构,内部有容纳电机和电子设备等的空间。躯体底板是上躯体和下方腿部的分界。

腿部剖面如图 9.6 所示呈箱形结构,图 9.6 中的天板和底板用 4 块厚度为 5mm 的加强板插入加固。外骨骼材料是 2~3mm 的 5052 铝合金板,经阳极化处理。

5. 腿部结构设计

图 9.14 给出大腿与膝盖连接部分的剖面。为了扩大膝关节的可动范围,该部分的

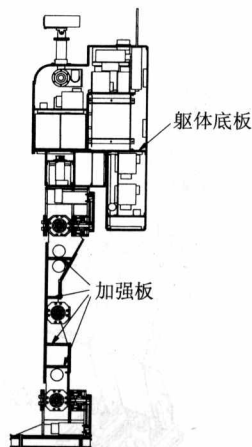


图 9.13 外骨骼结构

截面积最小,所以其属于刚性最薄弱的环节。计算该部分对中性轴的惯性矩和剖面系数有

$$I = 2 \int_0^{31} 3y^2 dy + 2 \int_{31}^{34} 11y^2 dy + \int_{34}^{37} 107y^2 dy \\ = 534\,125(\text{mm}^4)$$

$$Z = \frac{1}{c} = \frac{534\,125}{37} = 14\,437(\text{mm}^3)$$

因为铝合金 5052-H34 的弹性强度是 $216\text{N}/\text{mm}^2$,若安全系数取 4,工作应力设定为 $54\text{N}/\text{mm}^2$ 。此时,图 9.14 的剖面可以承受的最大弯矩 M_{\max} 是:

$$M_{\max} = \sigma_u Z = 54\text{N}/\text{mm}^2 \times 14\,437\text{mm}^3 \\ = 779\,610\text{N}\cdot\text{mm} = 779.61\text{N}\cdot\text{m}$$

根据图 9.12 中预想膝关节产生 $50\text{N}\cdot\text{m}$ 的转矩,即使假设它作用在结构上也足以能承受。

下面来考察图 9.14 所示的剖面结构的刚性问题。图 9.15 表示了“才华 3”的下蹲姿势。此时上半身的重量 $294\text{N}(=30\text{kgf})$ 沿铅垂方向作用于腰部。由“才华 3”膝关节可动范围的限制可知此时大腿和水平面成 30° 。把大腿模型化为无质量梁,假设膝盖被固定,并且把梁整体简化为具有如图 9.14 所示的统一剖面。再设单腿支撑体重, 294N 全部作用在一条腿上。 $P = 294\cos(\pi \times 30/180)\text{N}$, $l = 250\text{mm}$, 5052-H34 铝合金的纵向弹性模量 $E = 70\,560\text{N}/\text{mm}^2$,再将前面算得的中性轴惯性矩 $I = 534\,125\text{mm}^4$ 一并带入式(9.8)中,计算得到最大挠度为 $\delta_{\max} = 0.04\text{mm}$ 。由此可知,基本上不会发生明显的挠曲。实际上,膝盖刚性主要受谐波减速器柔轮刚性的左右。

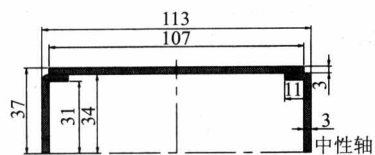


图 9.14 大腿剖面(单位:mm)

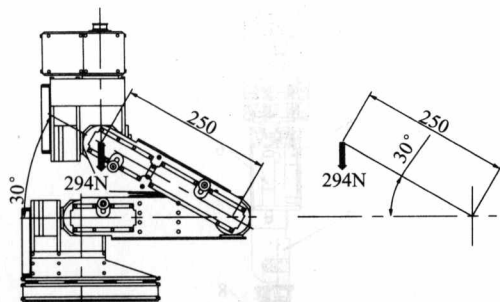


图 9.15 大腿的挠度计算(单位:mm)

图 9.16 表示了腿部电机和驱动器的配置。图 9.16 中只有电机 1、电机 7 沿纵向安装,其他电机均位于腿的内部,采取横向安装形式。

图 9.6 表示了腿部的骨骼结构,电机 3、电机 4、电机 5、电机 9、电机 10、电机 11(图 9.16)固定在侧板上。当然将电机改成沿腿的轴向配置,借助于锥齿轮将动力转换 90° 传递也未尝不可。若电机导致腿部宽度过大,就可以尝试这个方案。锥齿轮的齿侧间隙可以按后一级谐波减速器减速比的比例得到减小,所以也不至于造成问题。

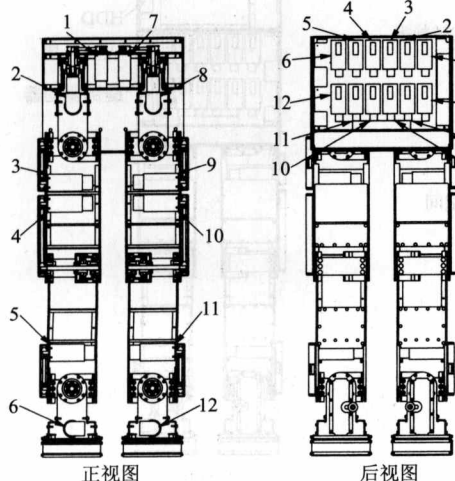


图 9.16 “才华3”腿部电机和驱动器的配置

图 9.17 给出膝关节的详细结构。直流电机和减速器平行放置。电机动力经带传动送到谐波减速器输入轴。膝关节内固定有谐波减速器的柔轮,电机驱动波发生器,柔轮产生输出。

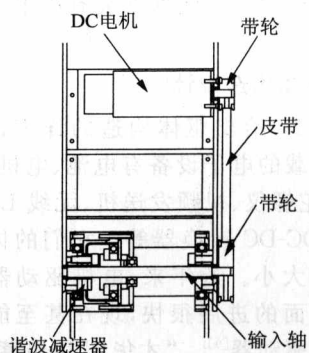


图 9.17 膝关节详细设计

图 9.18 给出髋关节的详细设计。髋关节有 3 个自由度,所有自由度的旋转轴均交汇于一点。3 个自由度中谐波减速器的柔轮均被固定,由波发生器驱动,使柔轮输出运动。

脚踝的 2 自由度机构基本与髋关节的机构相同,不过其减少了零件的种类,降低了成本。

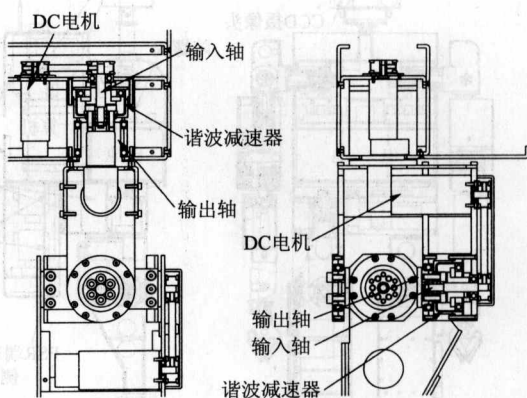


图 9.18 髋关节详细设计

6. 手臂结构设计

图 9.19 表示出手臂电机的配置情况。参考人的手臂,设计时将单个手臂的自由度数定为 7 个,另外配备仅能开闭的手部。电机 1~4 选用 Maxon Motor 公司的直流电机 RE25(额定功率 20W),电机 5、电机 6 为 RE16

(额定功率 4.5W), 电机 7、电机 8 为 RE13(额定功率 3W)。

电机 1~4 的输出和腿部一样采用谐波减速器。电机 5~8 上直接安装行星齿轮减速器。手部有 3 根手指, 由单个电机通过并联机构进行驱动。腕部安装有静电电容式力传感器。

7. 躯体构造设计

图 9.20 给出躯体构造的详细设计。躯体内部搭载的电子设备有电池、电机驱动器、计算机、陀螺仪、视频发送机、无线 LAN 调制解调器、DC-DC 转换器等。它们的体积决定了躯体的大小。近年来, 电机驱动器在小型轻量化方面的进展很快, 现在甚至能买到名片大小的驱动器^[9]。“才华 3”用铅蓄电池, 如果再进行设计可以改用能量密度更高的镍氢电池, 可以大幅度减小其体积。机器人的躯体是一个大空箱, 内部用加强板隔成若干个小空间(图 9.13)。躯体由 2~3mm 的 5052 铝合金板构成。

为了改进腿部电机驱动器的散热条件, 特地安装了热管和一个大型风扇。计算机散

热靠 4 个小型风扇。为了借用外部电源驱动, 躯体上部准备了外部电源接头。

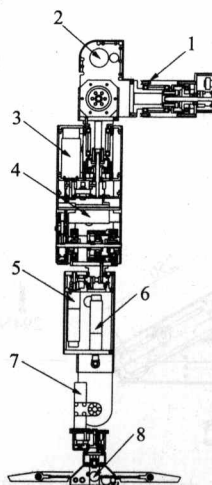


图 9.19 手臂的详细设计

9.3 控制系统设计

9.3.1 集中控制和分布控制系统

关于控制系统设计, 首先应该考虑的问题是各个自由度共用一个控制器即集中控制

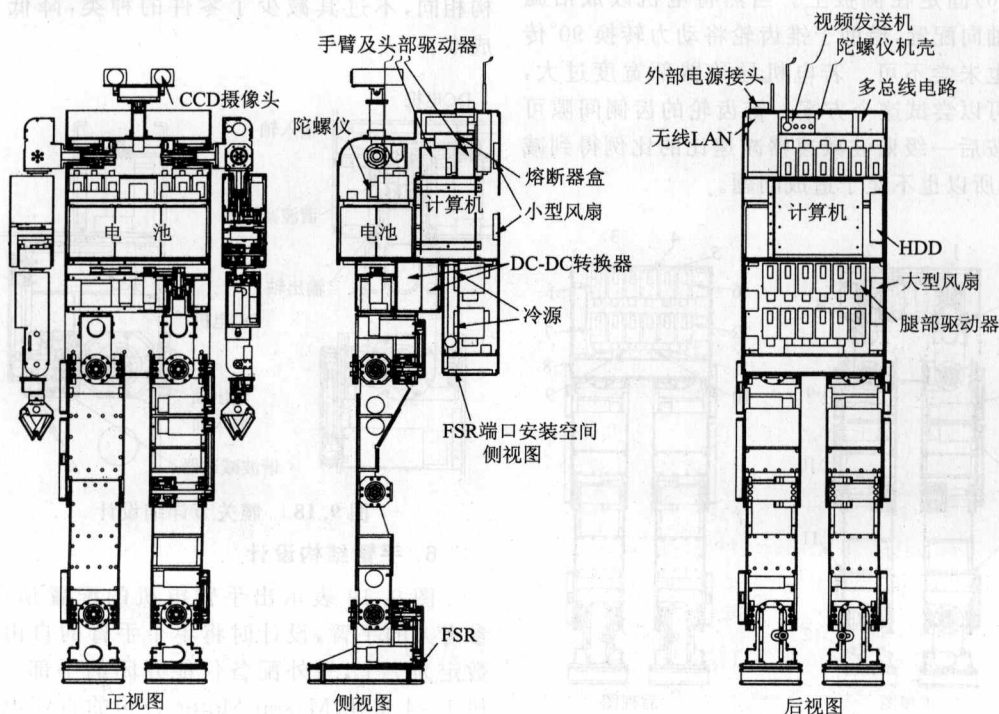


图 9.20 “才华 3”的躯体详细布置

(图 9.21),还是在各个自由度附近单独设置局部控制器(图 9.22)。迄今为止,机器人控制系统大多用一个控制器集中处理对所有驱动器发号施令和传感器信号。近年来,多自由度机器人有所增加,计算机性能提升得很快,总的来说,在控制器的处理能力中,伺服处理负担的比例反而有所降低。所以,将其设计成集中控制系统毫无问题。

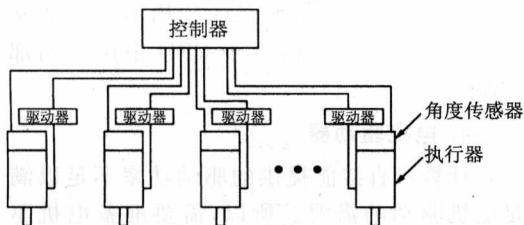


图 9.21 集中控制系统

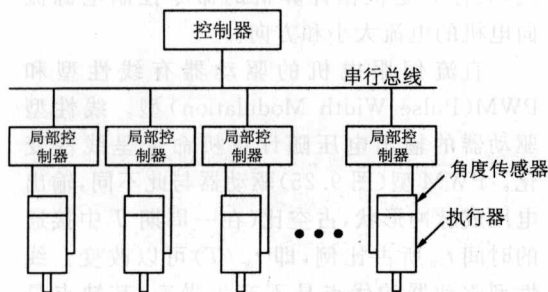


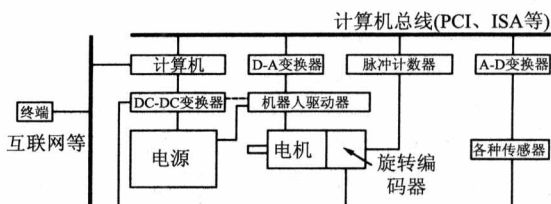
图 9.22 分布控制系统

但是随着自由度个数的增加,集中控制系统的布线量会激增,将各个部分做成易于拆卸的模块结构十分困难,所以在多自由度机器人中各个驱动器分别配以局部控制器的分布控制系统日渐增加。在分布控制系统中,中央控制器与局部控制器之间有关各轴角度信息和下达驱动器的位置命令的交互通常通过串行总线进行(图 9.22)。这样一来,比集中控制系统的布线量急剧减少,部件的拆卸也变得相当方便。从市场上即可购得采用 RS-485 通信的智能电机驱动器^[9],用它能很简单地建立分布控制系统。超多自由度的应用场合对通信速度的要求更高,因此有几种内部 LAN 的方案被提出来。内部 LAN 的详细情况请参照本篇第 8 章。

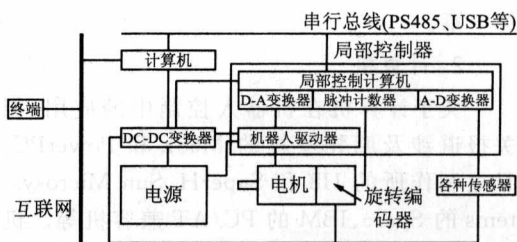
9.3.2 电子系统的构成

图 9.23 表示了集中控制系统和分布控制系统的电子设备的构成例子。无论是哪一

种结构至少都需要驱动器、角度或位置传感器、电源、计算机、DC-DC 转换器等。



(a) 集中控制系统的构成



(b) 分布控制系统的构成

图 9.23 电子系统的构成

构成集中控制系统所必需的设备器件有 D-A 转换器(向机器人驱动器发送命令)、脉冲计数器(用旋转编码器作角度传感器时)、A-D 转换器等接口(接收各种传感器信号)。

对分布控制系统来说,需要在局部控制器中嵌入上述设备和器件。具有代表性的例子是近年来日立制作所开发的 H8、SuperH,它们的 CPU 中集成了 A-D 转换、D-A 转换、数字 I/O,在控制器和接口体积方面比集中控制器显示出诸多优点,在应用方面也得到了普及。

如果改用电池作为电源,把计算机和接口内置到机器人体内,计算机和终端之间靠无线 LAN 通信,这样就能构成自主型机器人。

1. 电 源

机器人的内置电源最好用电池。具有代表性的电池有铅蓄电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池、锂聚合物电池等。处理最简便的是铅蓄电池,在移动机器人中使用最多,它的成本低,使用方便。

如果放电不充分,镍镉电池和镍氢电池会出现“记忆效果”,即无法继续放电。近年来,具备放电功能的充电器在增加,所以记忆效果已经不再是大问题。镍氢电池的能量密度比铅蓄电池高,质量相对较轻,所以人们期

待着镍氢电池在移动机器人中应用的普及。

锂电池属于目前能量密度最高的电池,尤其是锂聚合物电池可以做得很薄,在笔记本电脑、移动 AV 等设备中得到广泛应用。不过,目前机器人中使用的例子尚不多。目前存在的主要问题是保证过充电、过放电时的安全性和成本等。人们期待锂电池能应用到电动汽车上,因此推动了这项技术的急速成长,它也可望成为今后机器人电池的主流。

关于电池的详细情况请参见本书第2篇第3章。

2. 计算机

关于计算机在机器人控制中的应用,相关报道涉及摩托罗拉的 M68k 和 PowerPC、日立制作所的 H8 和 SuperH、Sun Microsystems 的 Sparc、IBM 的 PC/AT 兼容机等。机器人控制对 OS 有实时性要求,经常被使用的有 VxWorks^[10]、LynxOS^[11]、QNX^[12]、Windows NT、ITRON^[13]、RTLinux^[14]、ART Linux^[15] 等实时 OS(RTOS)。

IBM 的 PC/AT 兼容机在事务处理、论文撰写等方面被广泛使用,是研究者们十分熟悉的一款计算机,因为近年来又开发出实时 OS,故在机器人控制上也开始流行。IBM 的 PC/AT 兼容机里有 Card PC、PC 104(+),half size SBC(single board computer)、full size SBC 等多种机型可供选择。从选用 I/O 电路板的角度来看,若只需要 ISA 总线,则可以选择 Card PC 或 PC 104;若需要 PCI 总线,则可以选择 PC 104(+),full size SBC。Half size 的 SBC 大多只装备 ISA 或 PCI 总线其中之一,如果是 PISA 总线规格,则可以使用 ISA 或 PCI 两种总线。PISA 总线宽度与 ISA 总线的相同,端子可以沿深度方向进行扩展(图 9.24)。PISA 规格的计算机一定要配置 PISA 总线用的底板(back plain)。



(a) ISA总线



(b) PISA总线

图 9.24 ISA 总线和 PISA 总线

3. 接口

从计算机向电机功率放大器发送命令需要 D-A 转换器,把各种传感器信号取到计算机里去需要 A-D 转换器,旋转编码器作为角度传感器时需要脉冲计数器。近年来,制作多自由度机器人的例子逐渐增多,需求也变大,因此集成多通道 A-D、D-A、脉冲计数器的同一块接口电路板已经被开发出来并已上市销售^[9]。图 9.24(b)所示的结构中就把通常所需要的各种接口内置于 CPU 中用作局部控制器。

4. 电机驱动器

计算机直接能提供的驱动功率不足以满足电机驱动的需要。所以,需要准备电机驱动专用电源,电机驱动器位于电源和电机之间,其任务是根据计算机的命令控制电源流向电机的电流大小和方向。

直流伺服电机的驱动器有线性型和 PWM(Pulse Width Modulation)型。线性型驱动器的输出电压随计算机命令呈线性变化。PWM 型(图 9.25)驱动器与此不同,输出电压成脉冲形状,占空比(在一周期 T 中接通的时间 t_{on} 所占比例,即 t_{on}/T)可以改变。线性型驱动器的优点是不产生噪声,其缺点是电力消耗大,因此它主要用于小型电机。大多数中、大型直流伺服电机采用 PWM 型电机驱动器。

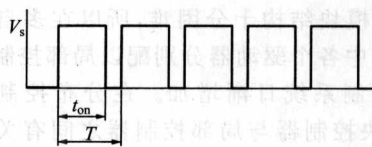


图 9.25 PWM 型输出

为了控制电流方向,电机驱动器设计成如图 9.26 所示的 H 桥形式。图 9.26 中开关 SW1~SW4 由功率 MOSFET 或功率双极型晶体管构成,彼此连接成 H 形(故称为 H 桥)。除这种用 MOSFET 等组成的 H 桥之外,市场上也出售嵌入 H 桥的电机驱动 IC。一般的电机驱动 IC 有两个数字输入端,通过它们的 on 和 off 的组合可以指定图 9.26 所示的 4 个状态。如果是小型电机,从市场上购回电机驱动 IC 后附加简单回路即可以充当电机驱动器。即由计算机生成旋转方向命

令和 PWM 信号, PWM 信号 on 时正转(或反转), off 时电机不受控, 就能组成简单的 PWM 型电机驱动器。如何使用电机驱动 IC 制作 PWM 型电机驱动器可以参见文献[16]。

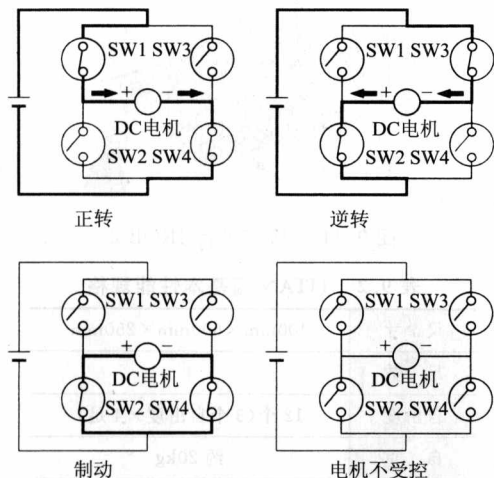


图 9.26 H 桥

近年来, 市场上开始出售小型廉价的直流伺服电机驱动器, 使机器人设计时的选择性更多了。这种市售电机驱动器由计算机输入 $\pm 10V$ 的命令电压, 然后根据命令电压产生 PWM 型输出电压。

作为用于交流伺服电机的各种小型放大器被开发出来, 不过还未正式向市场投放。

9.3.3 驱动器的控制

驱动器涉及硬件的控制, 分为电流控制、速度控制和位置控制。这里对控制方式进行简单的说明。应该指出, 本小节涉及的电流控制系统、速度控制系统、位置控制系统都属于硬件层次的, 不属于软件伺服的范畴。

1. 电流控制系统

驱动器产生的转矩与流过驱动器的电流成正比。这与把各个关节的转矩看成机器人的输入的控制理论是一致的。如果打算让机器人充当控制理论的实验平台, 就应该构成这个控制系统。其缺点是控制稳定性依赖于软件构成的控制系统, 所以容易失控。具有电流控制模式的电机驱动器的内部通常都有电流反馈环, 它的连接十分简单(图 9.27)。电机驱动器带有电流监视端子, 可以根据需要把电流监视信号回传到计算机上。

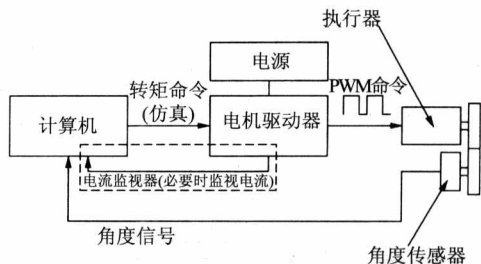


图 9.27 电流控制系统

当要购买电机驱动器时, 有必要确认是否带有电流控制模式。电机驱动器一般只配有速度控制模式。

2. 速度控制系统

图 9.28 给出了典型的速度控制系统。在该系统中, 转速或通过角度传感器信号进行微分, 或通过 F/V 变换(若角度传感器信号是脉冲), 或用测速发电机进行检测, 然后反馈构成基于速度命令的闭环。

速度控制相当于把 PID 控制中的 D 控制部分改成硬件来实现, 所以系统整体的稳定性得到了提高。

现在工业界流行的机器人控制器大多属于速度控制器。市售的电机驱动器大多也只有速度控制模式。通常关节角度误差是在计算机内计算的, 然后作为速度命令向机器人驱动器发布。

当电机驱动器内带有电子调速电路器时, 由于速度信号由该回路产生, 因此不需要角度传感器的微分或测速发电机信号的反馈。

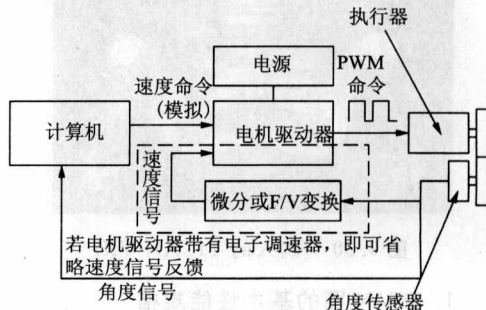


图 9.28 速度控制系统

3. 位置控制系统

图 9.29 表示了一个典型的位置控制系统。如果电机驱动器中带有位置控制模式,

要求用角度传感器信号做反馈。以硬件构成的位置控制系统比软件位置反馈系统的反馈频率高,因此其能设定更高的闭环增益,实现高精度控制。

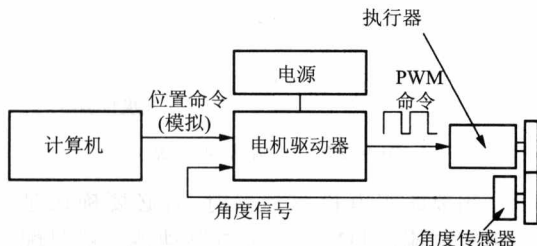


图 9.29 位置控制器

不过,如果向驱动器下达的全部是位置命令,那么它并不适合验证控制理论。在应用于柔顺控制时还需要设法把力矩命令转换成相应的位置命令。

图 9.23(b)所示的分布控制系统通常是由局部控制器完成位置控制的,尽管也有硬件或软件构成闭环的区分,但都可以统称其为位置控制系统。

9.3.4 实际控制器系统设计

本节通过实例对控制系统设计的实际过程进行解说。例子所采用的平台是采购来的4足步行机器人 TITAN-VIII(图 9.30),然后将它改装成自主步行机器人 JROB-2(图 9.31)^[17,18]。

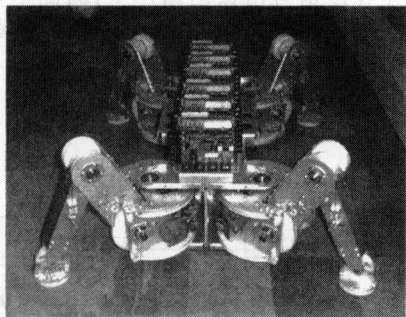


图 9.30 购入的 TITAN-VIII

1. TITAN-VIII的基本性能规格

4足机器人 TITAN-VIII由东京工业大学开发,东京精机进行销售。购入的 TITAN-VIII如图 9.30 所示,其上部整体搭载机器人驱动器。购入时未附带计算机和其他电子设备,故需要另行采购并制作控制系统。表 9.2 归

纳了 TITAN-VIII的性能规格数据。

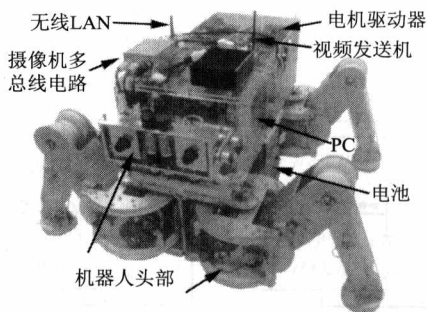


图 9.31 研究平台 JROB-2

表 9.2 TITAN-VIII基本性能规格

尺寸	400mm×600mm×250mm
足数	4
自由度	12个(3个自由度×4足)
自重	约20kg
承载质量	约7kg
驱动器	直流伺服电机(50W×12)
驱动电路	TITECH ROBOT DRIVER×12
位置传感器	电位计
电源	DC 6~48V(电机驱动)
	DC 5V,±15V(放大器驱动)

2. JROB-2的结构设计和基本性能规格

JROB-2在 TITAN-VIII的基础上集成了计算机、电池、其他电子设备、机器人头部等,属于一种自主移动研究平台。

在改装中把原搭载在 TITAN-VIII上部的12个机器人驱动器(图 9.30)集中在上部的后半部分,腾出上部空间的前半部分放置计算机,并重新设计了计算机、放大器的机箱(438mm×192mm×155mm)。机箱中容纳了9种元器件(图 9.32)。JROB-2的质量分配

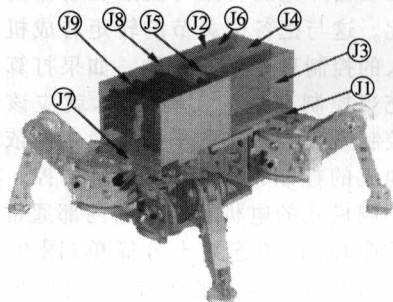


图 9.32 JROB-2 机箱设计

如表 9.3 所示。包括电池在内整个控制系统的质量约为 10kg。但机器人头部的(约 1kg)质量另计。

表 9.3 JROB-2 的质量分配

TITAN-VIII	18.0kg
上部机箱	1.2kg
电机驱动器	1.6kg
计算机	1.7kg
电 池	4.0kg
DC-DC 转换器	1.5kg
其 他	0.5kg
总质量	28.5kg

计算机的前端安装了 3 自由度的机器人头部。经过头部观察到的图像提供给视频发送机变成 UHF 的 TV 电波最终被送到终端。

OS 采用 RTLinux^[14] 扩展的实时 Linux。因为搭载了电池,故通过无线 LAN 与外部计算机通信机器人即可实现自主行动。

3. 电子设备的构成

图 9.33 给出 JROB-2 的控制系统。TITAN-VIII 中有电位计(角度传感器)、冈崎产业制造的 TITECH ROBOT DRIVER ver. 1^[9] 电机驱动器(以下简称 TITECH DRIVER)。它有电流控制、速度控制、位置控制三种模式,把电位计信号连接到 TITECH DRIVER 上就可以构成位置控制系统。JROB-2 使用速度控制模式。TITECH DRIVER 内置电子调速器,故无需向驱动器反馈测速发电机或角度传感器信号就能实现速度控制。

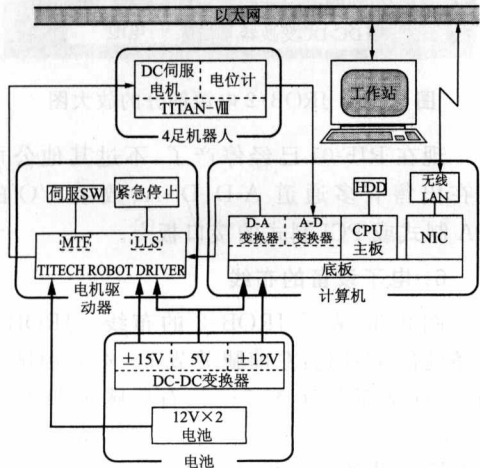


图 9.33 JROB-2 控制系统

搭载的主计算机取自 IBM PC-AT 兼容机的一部分,通过 A-D 转换器读取电位计检测到的关节角信息。来自计算机的控制命令被 D-A 转换器转换成 $\pm 10\text{V}$ 的模拟信号输入 TITECH DRIVER。

主计算机是通过无线 LAN 连接于网络,可以接收来自外部终端的动作命令。

4. 电 源

电源使用两个串联的小型密封铅蓄电池,电压为 12V、容量为 $5\text{A}\cdot\text{h}$ 、体积为 $90\text{mm}\times 70\text{mm}\times 100\text{mm}$ 、质量为 2kg。电机动力源直接使用串联 24V 电源。

电子设备的电源分别需要 +5V、 $\pm 12\text{V}$ 、 $\pm 15\text{V}$ 等。 $\pm 15\text{V}$ 对于 TITECH DRIVER ver. 1 是必要的,不过 ver. 2 和 ver. 3 已经改成单电压电源驱动,不再需要 $\pm 15\text{V}$ 。

为了从电池的 24V 中取出 +5V、 $\pm 12\text{V}$ 、 $\pm 15\text{V}$ 需要 DC-DC 转换器。

选择 DC-DC 转换器时应该事先估计一下各个电压大致上需要多大的电流。JROB-2 的电流估计值如表 9.4 所示。

表 9.4 JROB-2 需要的电流估计

电压/V	电子设备	安培数/A
+5	主板	6.00
	TITECH DRIVER	0.96
	硬盘	0.68
	无线 LAN	0.65
	接口板	0.40
	图像处理板	1.20
	合计	13.89
+12	主板	0.02
	CPU 风扇	0.06
	硬盘	0.30
	接口板	0.06
	2 台 CCD 摄像机	0.68
	图像处理板	0.50
	合计	1.62
-12	主板	0.02
	接口板	0.04
	图像处理板	0.08
	合计	0.14
+15	电机驱动器	0.92
-15	电机驱动器	0.80

标记,这表示使用 3.5mm^2 截面积的红色导线。向电机驱动器 V_{dd} 端子提供 $+24\text{V}$ 的导线在激烈动作时会有大电流通过。估计 JROB-2 的最大电流为 40A ,布线应该根据这样的电流数进行安排。

查阅 JROB-2 布线的导线产品目录,线径为 5.5mm^2 的导线在 30°C 时允许电流为 45A , 3.5mm^2 时为 33A , 1.25mm^2 时为 12A , 0.75mm^2 时为 7A 。布线分为前部(关节 1~6)和后部(关节 7~12),并分别接入 20A 的熔断器。

电位计由 TITECH DRIVER 的 $\pm 10\text{V}$ 端子进行供电。电位计的针脚 1、3 分别接 $+10\text{V}$ 、 -10V ,针脚 2 接 RIF-01 的 AD。购入时电位计的原点不一定调定,所以需要自行做零点标定。

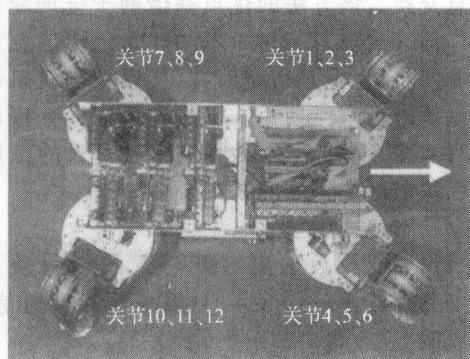


图 9.36 各个关节的序号

近野 敦

9.4 通信及信息处理设计

9.4.1 通信的作用

机器人是持有各种目的、功能、性能的多个功能单元(以下称为模块)的集合体。机器人各个模块之间在进行密集信息交换的同时,它又作为一个整体实现整体功能。

比如,车轮型移动机器人为了推测自身位置,需要将多个信息,如车轮旋转角度和路标信息、自己持有的地图信息等综合运用。另外,车轮旋转角度信息,又在车轮高精度稳定转动控制中被利用,地图信息又在机器人移动路径规划中被利用等。于是各个模块之间的信息流动构成一个复杂的网络。

如果模块数量较少,那么根据需要更改布线,或者修正程序都不会太困难,但如果模

块数量很多,困难程度也会急剧上升。

在多台机器人协调动作的场合,机器人彼此之间也必须进行信息交换。

为此,建立更通用的信息交换机制是必要。这就是通信(communication)。

这里使用的通信这个词是广义的,比如,单一程序内的信息交互(变量参考)等都被称为通信。

通信的作用有以下四点。

1. 信息共享

信息共享即多个模块之间共享数据的功能。有以下几种共享模型:①信息提供方主动(强制)地向接收方发送数据的模型;②应接收方的请求发送的模型;③将数据放入适当共享区内,收、发双方都能随时参照的模型。

2. 命令传达

请求其他模块开始或结束动作的功能。这与主动向接收方发送数据的信息共享模型有大致相同的结构。

3. 同步

使多个模块动作时间一致的等待功能。比如,确认某个模块动作结束后开始下一个动作的顺序动作,以某个模块为契机多个模块同时开始动作的功能等。

4. 排他

如果多个模块共享一个功能或模块,为了不发生矛盾和冲突,在某个瞬间只允许少于预定数量的模块使用该功能或该模块。

9.4.2 信息交换模型

进行通信至少有两个必要条件:①访问地点(address);②被交换信息本身(data)。根据如何处理这两个条件,存在不同的信息交换模型。

1. 直接指定和间接指定

指定地址数据的方法有直接指定(direct addressing)和间接指定(indirect addressing)。下面举例进行说明。

要通过互联网访问某个 Web 时,很少有人会去直接指定 IP 地址(例如,IPv4 就是 $172.16.xx.xxx$),取而代之的是使用名称($xxx.foo.bar.jp$ 等)。前者叫做直接指定,后

者叫做间接指定。间接指定通过在目的对象中夹带更普遍的、更抽象的信息使目的对象被“间接”地指定。在该例中,把 xxx.foobar.jp 变换到 172.16.xx.xxx 的部分称为域名分析(name resolving),这在互联网中用得很普遍。当然,机器人内的通信也能灵活运用相同的手法。

单一程序中最常使用的间接指定的技巧是指针(pointer)。它属于特别变量,以数据的形式持有存储目的信息的内存地址。

举一个间接指定数据的例子。例如,直接指定“传感器 A 的测量数据”,可以改成更为抽象的指定方式“离机器人最近的障碍物的距离和方向”。

所谓间接指定,就是一种通过夹带目的对象地址数据的“抽象”信息的方式,达到动态地访问对象场所和信息的机制。其间虽然在域名分析处理上多花费了一点处理时间,但是却大幅度地提高了可维护性。

2. 直接通信和服务端/客户端模型

除各个模块之间各自独立地与对方直接通信外,还有一种通信方式,能始终只与某个特定模块保持通信以完成整体通信的任务。图 9.37(b)所示的设置数据交换服务器的方法就是一例。

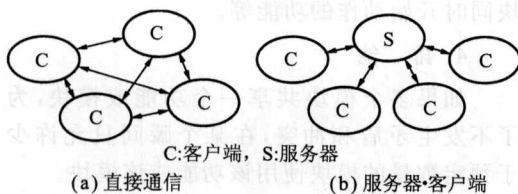


图 9.37 直接通信和服务端/客户端模型

这样,各模块之间的通信程序代码不仅变得简单,还可以方便地进行通信的统一处理,或者是通过对通信履历的集中管理发现问题。

这种方式的缺点是全部通信都要经由一个特定的模块,所以必须注意处理工作负担的过度集中或通信延迟的加剧。

3. 通信模型的例子

下面举几个典型的通信模型的例子。

1) 报文传送(message passing)

由发送信息方选定接收方进行通信的方式,是最基本的通信方式。但是发送方需要

事先知道所传达信息的接收方是谁,或者允许执行请求功能的一方是谁。正是由于这个原因,在追加新模块或删除已有模块时,往往需要对剩下的全部模块加以修正。

不过上述缺点通过地址和数据的间接指定可以或多或少地得到克服。

2) 广播通信(broadcast)

该方式通过对所有的模块一齐发送(广播)达到信息传递的目的。所以,发送方无需选定通信对方,但对每个接收方来说都需要判断送到的信息是不是发给自己的。显然,随着模块数量的增加,该方式的无用通信消耗也会增加,通信量变得很大,所以在带宽有限的通信路径上使用时应特别留意。

3) 共享内存

全部模块利用可读写“共享区域”来完成信息交换。该方法的优点是借助于全局变量或广播方式实现起来很简单,既允许信息交换非同步,也不必指定对方,所以在构筑机器人系统时被广泛使用。不过如果在同一区域内写入多个模块,必须十分注意写入的顺序及模块之间的调停问题。

4) 事件存储器^[2]

设置交换数据用的服务器,全部模块只与事件存储器(event pool)服务器相互通信,构成服务器/客户端系统(图 9.38)。

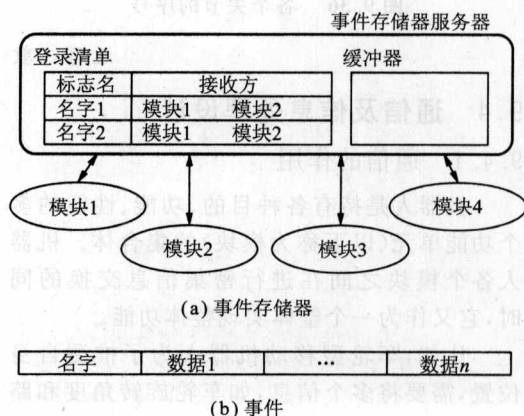


图 9.38 事件存储器系统

全部交换数据由 1 个标签和 0 个以上数据组组成的包(叫做事件)来完成。操作方式有登录(register)、写入(put)、发送(deliver)、终止(cancel)四种。

希望得到数据发送的模块需要预先在服务器上登录打算发送的数据标签。在图 9.38 的例子中,表示两个事件各有两个模块登录了发送请求的状态。

事件被写入服务器后,需要调查标签名,然后把数据发送给被登录的模块。如果停止发送,那么应该将该标签名通知服务器,将其从登录列表中删除。

4. 关联技术

1) 信号杆标志

信号杆标志(semaphore)是实现模块之间排他控制和同步的基本机制,它与 PV^[1]命令组合使用。

信号杆标志是一个保持当前可利用资源数的计数器。如果某个模块实行 P 命令,首先应该弄清楚可利用资源数计数器,若为正,就将计数器的值减 1 并继续实行;若为负,就让该模块待机执行。如果其他模块实行 V 命令,计数器的值就加 1,若有模块处于待机状态就回到可执行状态。

通过改变计数器的初值或执行 PV 命令时的加、减值,就可以实现排他和同步等机制。

2) 令牌

令牌(token)是计算机或通信领域中作为符号、标记、传票等意义被使用的东西^[1]。

在通信中它经常起到防止数据冲突的作用。比如,让互相连接的模块之间交换令牌,只有持有令牌的模块方能具有通信的发送权。通信结束后该模块必须立即将令牌出让给其他模块。

9.4.3 通信相关问题

1. 死锁

多个模块共享有限资源时,有时会陷入互相进入等待资源的状态,这样就有可能造成处理的中止,即所谓的死锁(deadlock)状态。

考虑两个模块共享资源的例子(图 9.39)。模块 1 获得资源 1 后想要获得资源 2。同时,模块 2 获得资源 2 后想要获得资源 1。如果预先设定让两个模块等待直到获得资源为止,那么在图 9.39 所示的时机若获得要求则出现死锁。

避免死锁的措施是要么在等待一定时间

后若仍未获得资源就毅然决定放弃获得,要么就预先准备好足够的资源以防止发生争夺。为了避免出现死锁的问题,往往应该在设计算法时特别地留心,最重要的是事前在计算机上做充分的仿真。

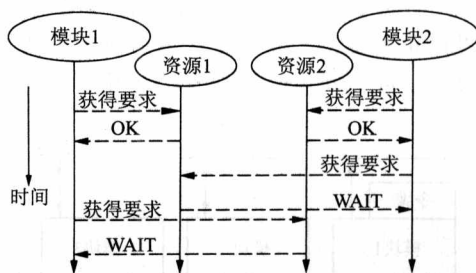


图 9.39 死锁

2. 实时性

在很多场合机器人系统都必须对通信时间进行严格管理。这种管理时间的性质称为实时性(real time)。有两种实时性:硬实时(绝对不允许比规定时间慢)和软实时(或多或少地允许延迟,但应该保证平均带宽)。

典型的通信过程如图 9.40 所示,是接收方每次通信都必须逐一返回确认响应的形式。通常可以根据每次通信量和传输线路的速度简单地求出数据通信和处理所需要的时间为 T_2 、 T_4 (不过在以太网等使用的 CSMA/CD 方式中推测 T_2 、 T_4 也不大容易),所以成为问题的往往是如何确保通道所需要的时间 T_1 、 T_3 。

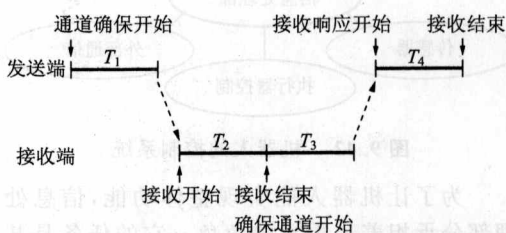


图 9.40 通信流程

如果每个模块都配备专用的处理单元和通信单元,那么 T_1 、 T_3 的估计相对会较容易一些。但是有很多场合这两个单元是多个模块共享的,这样就不得不等到其他通信结束后才开始发送,于是对 T_1 、 T_3 的估计就比较困难了。

迄今为止,人们提出了几种持有硬实时特性的通信方法。这里以令牌传递(token

passing)方式为例加以介绍。

令牌传递方式是在共享通信回路的多个模块之间,让1块令牌按顺序交换来控制通信。该方式中的模块只有手持令牌方能向通信回路发送数据(图9.41)。如果规定1次可以发送数据的大小,那么根据连接的模块数,就可以正确地推测轮到下一次令牌返回为止的时间。这个方式在ARCNET^[3]中得到实际应用。

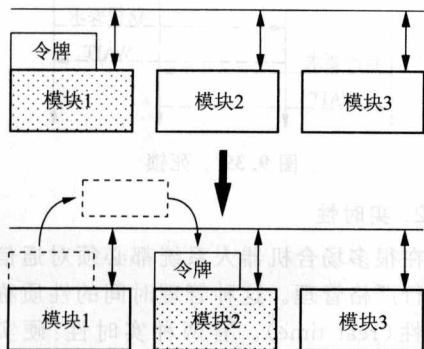


图 9.41 标志通过方式

有人曾特别注意令牌在机器人控制中的应用,提出了实时通信硬件和通信的方式^[4]。

9.4.4 信息处理设计

机器人控制系统一般由如图9.42所示的几大部分组成。



图 9.42 机器人的控制系统

为了让机器人能实现整体功能,信息处理部分承担着最重要的角色。它的任务是基于环境和作业顺序建模,根据传感器的当前信息对下一步行动做出决定。它的内部通常有很多小的子块,它们在彼此作用的同时完成信息处理。

本小节将举几种具有代表性的信息处理部分,就它们的内部组成方法加以说明。

1. 状态迁移型结构

这是实际应用中使用的最广泛的典行方法之一,直接用状态迁移图(state transition dia-

grams)和流程图(flow chart)把环境和作业顺序表示出来。

图9.43中描述了向桌子移动后抓住杯子的有关动作的状态迁移图。例子中机器人的动作被分解成几个小步骤,根据各自之间完成、未完成、失败等结果发生迁移。

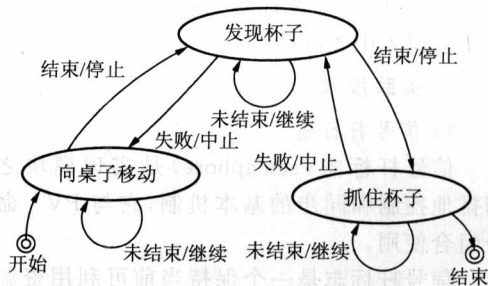


图 9.43 状态迁移图

组成这个信息处理部分很容易,但问题在于使状态迁移时只能参照某有限范围内的信息。即假如抓取桌子上的杯子时,手臂的肘部接触到未曾设定的某物时该怎么办?若要描述这些处理,问题就一下子变得复杂且困难起来。

最适合机器人的动作环境是那些事先能排除大部分困难的工作场合,比如,在整齐划一的生产线上工作的工业机器人的控制。

2. 归类结构^[5]

归类结构是机器人由几个“动作(behavior)”(也称为行动)来控制的结构(图9.44)。各个动作直接接收传感器信息,如果它们满足该动作特有的条件就执行这个动作。这些动作是分层的,执行稍高一级的动作时低一级的动作被屏蔽。有时,高一级的动作甚至可以取代低一级的动作来执行。



图 9.44 归类

图9.44中,最低一级的动作是徘徊,即为寻找目标做随机运动。如果在动作中遇到障碍物,它就停止徘徊回避障碍物。如果发现目标,它就朝向目标移动。执行该过程期间通常包括障碍物回避动作。

这样的构成方式称为反应系统(reactive system)。该系统不靠高深的推论规划机器人的行动,而是根据当前的状况采取断续行动。

这种结构可以产生超出我们想像的复杂行动,不过如果让机器人既按照归类结构行动又按照一定顺序做有规划的行动是困难的。

3. 智能体结构

所谓智能体(agent),是指基于各自的认知和判断自发进行动作的独立单元行动。归类结构的各个动作也可以被视为智能体。不过这里涉及的是更一般的构成。

智能体结构的目标是由各个智能体各自行动的结果从总体上产生有意义(根据场合可以是智能的)的行动。

以契约网络协议为例^[6,7]进行说明。它模仿人类社会的契约过程。当智能体有委托事项意愿时,它应该知会其他智能体具体的意愿内容。于是,有意愿执行该事项的其他智能体在出示执行成本(比如,执行时间)后进行投标。委托提出方(智能体)依照自己的评价标准从所有的投标智能体中决定最合适的契约者,将事项托付给它执行。

智能体结构有很好的发展前景,重要的是在所有智能体之间制订合理的评价标准。实际上,有关这方面的设计理论目前还在讨论之中。

高桥隆行

参考文献

- 9.1 系统体系结构设计
- [1] 飯田重喜:車輪型移動ロボットの走行制御システムに関する研究,筑波大学大学院博士課程工学研究科学学位請求論文(1991)
- [2] 坪内孝司:車輪移動体の制御,日本ロボット学会第43回講習会〜ロボット工学入門シリーズVIII<移動技術編>〜移動ロボットのやさしい解説資料(1995) pp.58-68
- [3] IA-32 インテル(R)アーキテクチャ・ソフトウェア・デベロッパーズマニュアル(下巻)システムプログラミングガイド 第5章,インテル(株),<http://www.intel.co.jp/jp/developer/download/index.htm>.
- [4] SH 7040 シリーズハードウェアマニュアル(ADJ-602-128 D)(株)日立製作所半導体グループ電子統括営業本部,平成11年9月第5版,http://www.hitachisemiconductor.com/sic/resource/japan/jpn/pdf/mpumcu/j_602128_sh_7040.pdf.
- [5] 特集リアルタイム OS 選択のポイント,インターフェース, CQ 出版社(2001年12月号)
- [6] 白川,竹垣:リアルタイムシステムとその応用,システム制御情報ライブラリー 22,朝倉書店(2001) p.120
- [7] 石綿:リアルタイム処理を実現する ART-Linux の設計と実装,インターフェース, CQ 出版社, No. 12 (1999) p.120
- [8] 稲葉:リモートブレインロボット,計測自動制御学会誌, Vol.35, No.4 (1996) p.286
- [9] H. Asoh, I. Hara and T. Matsui: A Structured Dynamic Multi-Agent Architecture for Controlling Mobile Office Conversant Robot, Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1998)
- [10] 山崎,安西:パーソナルロボット用機能別並列計算機アーキテクチャ:ASPIRE,情報処理学会誌, Vol.37, No.1 (1996) pp.81-91
- [11] 鈴川,坪内,油田:自律移動ロボット「山彦」アーキテクチャの PC/AT へのシステム実装,第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) 3 K 25
- [12] 山崎,松井:並列分散リアルタイム制御用レスポンスプロセッサ,日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3 (2001) pp.68-77
- 9.2 结构设计, 9.3 控制系统设计
- [1] (社)日本機械学会編:機械工学便覧 B-4 材料学・工業材料,(社)日本機械学会(1987)
- [2] 日経メカニカル, No.546, 日経 BP 社(2000) p.33
- [3] 日経メカニカル, No.556, 日経 BP 社(2001) p.32
- [4] 日経メカニカル・日経デザイン編:RoBolution, 日経 BP 社(2001)
- [5] 坂本昭:先進複合材料,日本ロボット学会誌, Vol. 13, No.2 (1995) pp.164-167
- [6] 機械設計便覧編集委員会:機械設計便覧(第3版),丸善(1992)
- [7] ティモシェンコ,ヤング:改定 材料力学要論,前澤成一郎訳,(第20版)コロナ社(1983)
- [8] A. Konno et al.: Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (2000) pp.1565-1570
- [9] <http://www.okatech.com/index.htm>
- [10] <http://www.windriver.com>
- [11] <http://www.linuxworks.com>
- [12] <http://www.qnx.com/>
- [13] <http://www.itron.gr.jp/home-j.html>
- [14] <http://www.rtlinux.org>
- [15] <http://www.etl.go.jp/etl/robotics/Projects/ART-Linux/>
- [16] J. L. ジョンズ, A. M. フリン:移動ロボット 基礎科学と応用,熊切康雄訳,トッパン(1996)
- [17] 近野敦,横小路泰義,相山康道,坪内孝司,井上博允:研究用プラットフォームとしての脚型知能ロボット JROB-2,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集(1999) pp.2 A 1 47-078
- [18] 普及型多足歩行ロボットの機構・制御系・保養制御入門—RT-Linux を用いたリアルタイムシステムの構築—,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス

第 10 章 分布系统

10.1 分布式机器人系统概述

机器人是由执行器、驱动机构等的机械装置、传感器、控制装置等许多单元构成的系统。控制装置中的信息处理单元能够针对不同状况做出智能处置。随着小型、廉价、高性能处理器的出现,以及处理器之间通信技术的进步和标准的制订,单元本身带有智能信息处理装置的机器人系统,即分布形式的多个智能单元(称为智能体、子系统等)构成的机器人系统陆续被开发出来。这些机器人系统不仅持有多种信息处理装置,使其智能更高、速度更快,而且借助于各个模块之间的多种交互和通信,既能产生柔性动作,还能随环境和状况的改变而改变自身的构形。自上而下的有关分布式机器人系统的研究是以实现柔性协调动作作为目的的,探讨如何将必要的功能分布到多个单元中去,完成动作的协调。自下而上的有关分布式机器人系统的研究则以如何协调多个单元或机器人本身,以及如何实现更高级的动作为重点。

由多个智能信息处理装置和自主动作装置组成的系统被称为自主分布式机器人系统^[1,2],或者多智能体机器人系统^[3]。首先,各个单元具有模块化的结构,多个模块组合起来就组成机器人系统。由多关节组成的机器人,每个关节都嵌入智能动作装置,构成一个彼此边通信边运动的系统。它们分为串联结构,如机械手、蛇形机器人等,以及并联结构,如并联机器人、步行机器人(各条腿都有智能动作装置)等。虽然这些机器人的各个单元之间的物理结合(构造)是固定的,但是通过信息的结合(通信、信息交换)和变化又具有柔性的特点。实际上,有些系统甚至在物理结合方面也允许改变,例如,当某个模块(单元)出现故障能通过手工简单更换的所谓积木式机器人系统就可以归入此列。现在,甚至连结合本身也能由机器人自主决定,引

起结构自身变化的多体系统的研发也在进行中,我们称这样的机器人为自组织机器人系统。它又可以分为两类:一类是将同样构造的模块加以组合(同构, homogeneous)的系统;另一类是将不同构造的模块加以组合的(异构, heterogeneous)系统。

目前,自主型多机器人协调研究已经成为热点。这并非是指单个集中控制器操纵多台机器人动作的研究,而是指分布的多台自主机器人(机械手和移动机器人)彼此协调的技术。例如,现在有人正在开展用多台机器人抓取对象物的协调控制研究,多台自主移动机器人分布运动规划的研究,以及在一个系统里让多台自主传感器(视觉装置等)彼此协调,分布接收目标信息的研究等。有关多台移动机器人的协调,可以划分为合作/非妨碍协调^[4]、积极/消极协调^[5],通信/非通信(explicit/implicit)协调等策略。现在已经取得多项协调动作的研究成果。以生物为范例的仿生研究也很多。涉及通信协议设计、同步控制、通信时间延迟(稳定/非稳定、远程操作等)的控制方法、死锁解决方法等具体课题都在研究之中。

分布式机器人系统不仅促进了多模块或多机器人之间行动协调的技术研究,也不断推动涉及环境本身智能单元的配置方式,即所谓的泛在机器人学环境所涵盖的环境智能化技术的研发。分布式机器人系统的行为必须适应环境状况的变化而改变,因此预先描述动作是很困难的。为此,人们正在加强通过强化学习的手段来提高系统自身自主学习、获取知识能力方面的研究。比如,在创发(emergence)机器人学中,人们正在讨论如何设计单元与单元之间的局部交互,以便在宏观结构、功能、行为方面有所改进。

分布式机器人系统研究与多个交叉学科研究领域有密切的关系,例如,群体行动就涉及鱼群、鸟群运动的行为研究,蚁群、蜂群等

具有社会性的昆虫的通信/自组织的研究,以及其他一些社会生物学方面的研究;在通信/协调的方法方面,与认知科学、语言学等有关;在协调的实现方面,与计算机科学(如分布式人工智能、人工生命等)有关。最近,关于分布式机器人系统实际应用的讨论也逐渐热闹起来,也应用到 RoboCup(机器人足球比赛)上。

浅间 一

10.2 可重构机器人

机器人(包括所有机械)都有特定的使用目的,应该按照其使用目的开展设计。当然,机器人的构形(configuration)也必须为这个目的服务。不过,有些任务靠事先设计构形和功能是难以完成的。比如,在受灾倒塌的房屋内进行搜索,在遍布复杂管道的车间内检修设备,在频繁变更布局的厂区内操作或装配,在环境未知的行星上从事搜索任务等,在这些应用场合与其追求完美的特定功能,不如通过多样的动作模式,追求因地制宜地完成各种工作的适应性。拟人机器人在能够完成人类所能胜任的工作这层意义上被认为是万能的,但是如果我们能够进而打破拟人形体的局限,使机械构形能够自由改变,那么就为实现更广泛的功能创造了条件。出于这种理念,人们正在开展各种可重构机器人的研究。

可重构机器人是不事先决定机器人的整体构形,而是具有运用自己内部的多个自由度,产生各种不同整体构形能力的机器人。可重构机器人分为两大类:一类叫做人工可重构(reconfigurable)机器人,它需要额外依靠人工参与改变机器人的构形;另一类叫做自重构机器人(self-reconfigurable),它靠自身即可改变构形。

先来看人工可重构机器人。它的典型代表是模块化机械手系统。事先准备好大大小小的各类关节模块,根据作业工作空间和负载的不同,可以人为地选取模块组合进行装配^[1]。通常的串联机械手、并联机构模块化机械手也被视为可重构机器人的研究对象^[2]。设想它们的任务是生产现场频繁变更任务的装配作业或充当修理人造卫星的机械手(观察故障状态后决定自己最合适的构形,

立即出舱进行作业)。还有人在研究由伸缩杆件组合起来的系统,用它们搭建各种形状的可重构桁架机器人^[3]。

再来看自重构机器人。它的各个模块必须具有彼此自动结合和脱落的对接机构,以便只依靠模块自身的功能就能实现模块的更换。自重构机器人又分为两种:一种是有若干个不同功能的模块,构成异构机器人(heterogeneous);另一种是只用相同模块,构成同构机器人(homogeneous)。

人们提出了几种组合异构机器人的方案,例如,将模块按特定的功能分成手部模块、关节模块、移动模块等组合成不同的机器人系统^[4],或者再与其他机械手组合成模块型机械手系统^[5]、空间机器人(可以在多个机械手之间互换模块)^[6]等。

比较起来,同构自重构机器人,因为它只限于单一的模块,其组合的自由度很高。所以,同构自重构机器人具有自装配(self-assembly)的功能,能够像搭积木那样任意构形,它也具有自修复(self-repair)功能,即自动地用其他模块来替换故障模块。图 10.1 表示了这个概念。图 10.1 中上面的一排组图表示自重构的过程,中间图中的小圆圈○代表一个模块。左图是初始状态(模块集合不定形)。多次交换模块后变成右侧的设定目标形状,即实现了自重构。下面的一排图表示自修复的过程。故障模块被检查出来后被自动切除,从备用品区域(本体右侧的三角形部分)运送备份单元进行重新装配,以便修复故障区域。

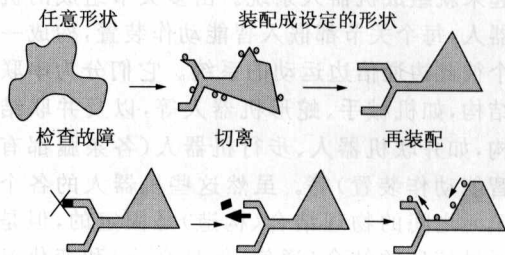


图 10.1 机械系统自装配和自修复概念

但是,实现上述复杂的构成过程是需要付出代价的,其代价就是模块中的接头部分占了很大的比重,便模块的设计也变得复杂。图 10.2 举出了利用电磁力结合的二维模块

系统的例子^[7]。每个模块上都搭载了微处理器,形成分布式控制系统,彼此可以通过光通信单元与相邻模块进行信息交换。全部模块都遵照相同的算法行动,或者发挥自组织功能,从整体上构成设定的目标形状,或者发挥自修复功能自动排出故障模块,使形状复原^[8]。针对该二维系统的装配算法的理论分析正在进行中^[9]。

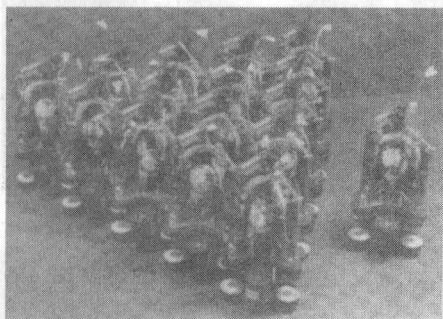


图 10.2 机械技术研究所的二维单元机械 (Fractum)

在三维自重构机器人的研究中,围绕立方体和菱形十二面体等空间多面体,提出了几种模块设计的方案。后来的研究就不再限于空间多面体,例如,有以两个立方体为基本形状,只包含转动自由度的模块设计。图 10.3 是达特默斯大学研究组的设计成果^[12],其整体构成很复杂,但是能实现三维结构的自装配。

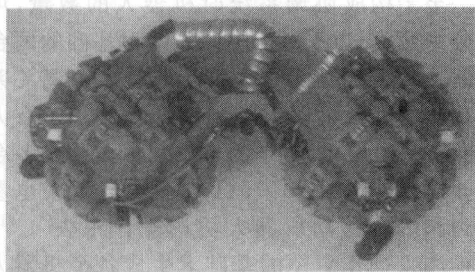


图 10.3 达特默斯大学的三维单元机械 (Molecule)

图 10.4 是产业技术综合研究所开发的模块,它的自由度虽然少但是可以自装配成各种机器人形状。以这些三维自重构机器人的硬件为前提,研究出所期望的构形的算法被认为是今后研究的中心。

村田 智

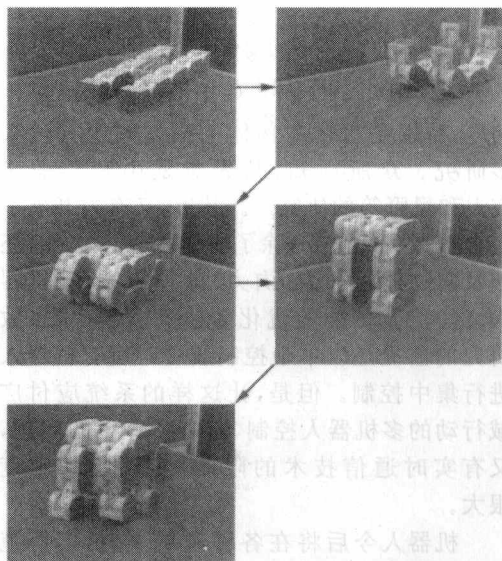


图 10.4 产业技术综合研究所的自重构机器人(M-TRAN)。可以从平面形状变为履带构形、四足步行机器人等

10.3 多台机器人协调控制

与多个人协调完成某一项作业一样,多台机器人协调也能使原本单台机器人无法完成的作业成为可能。比如,通过多台机器人协调处理单一对象物,增加了机器人系统整体的操作重量,能够处理重物 and 大型物体。同时也能实现更灵活、复杂的作业,例如,使对象物变形的作业、装配作业等。还有,如果能运用多台机器人将多种功能分配给每台机器人,这有利于实现各种更有效和更柔顺的作业。

从机器人之间力学相互作用的观点来看,多台机器人的协调大致可以分为两种情况:第一种情况是多机器人进行设施维护、检查、清扫、未知环境的搜索等作业,此时面临的问题是如何有效地进行作业,以及在力学上彼此独立控制各个机器人的运动规划;第二种情况是各个机器人经由对象物的中介彼此发生力学干涉的情况。此时面临的问题是如何通过机器人之间的协调控制实现对物体的协调操作和抓取。前一种情况将在本章的 10.4 节之后安排介绍,本节将针对第二种情况,即基于力学相互作用的对象物操作问题进行解说。

10.3.1 单一物体的操作

有关基于力学相互作用的对象物的操作问题,特别是对单一物体的操作问题有过很多研究。众所周知,其先驱是中野等的研究^[1]和黑野等的研究^[2]。其后,又有人开展了多台机械手的研究,除了物体操作方法外,还涉及向物体施加力(内力)的控制方法、机器人之间负载分配的优化等研究。其中,多数研究的前提是以单个控制装置对所有机器人进行集中控制。但是,让这样的系统应付广域行动的多机器人控制,既有计算量的问题,又有实时通信技术的限制,实现起来难度很大。

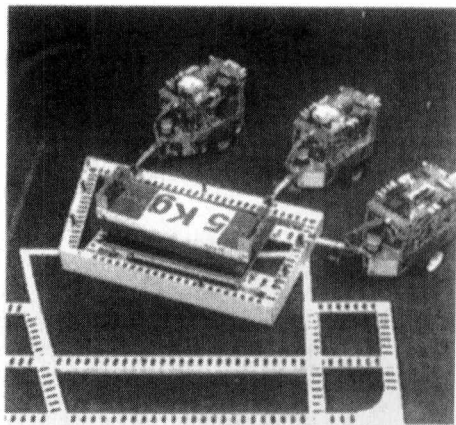
机器人今后将在各种领域,包括工厂范围内和生活中都将广泛应用。为了扩大它的移动范围,移动机构必不可少。再从安全性的角度来看,小型机器人似乎比较方便。因此,机器人各自搭载控制装置,分别进行独立控制的分布控制移动机器人的协调控制系统受人瞩目。本节专门研究处于分布控制的多台移动机器人协调工作实现物体操作的方法,并介绍几种典型的控制系统。

10.3.2 分布协调控制算法

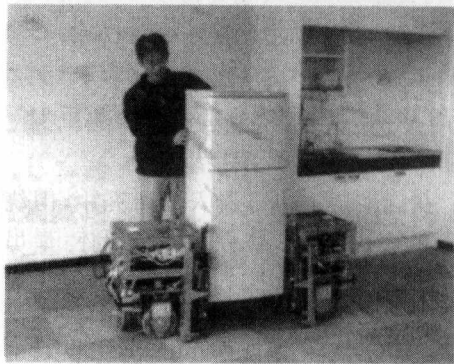
近年来,研究人员提出了很多实现多移动机器人分布控制进行物体操作的控制系统方案。若按照机器人的移动机构来进行分类,有双轮或履带型的非完整约束移动机器人方法^[6,7,10,16,18]、全方位移动机构的完整约束移动机器人方法^[9,19],最近还有人研究将机械手搭载在移动平台上,用多台移动机械手进行协调的控制方法^[11,13],以及多足机器人的协调作业方法^[14,15]。

协调操作的实现方法因为机器人与物体、机器人与环境之间的相互作用的情况各自不同,所以,针对不同相互作用的各类物体操作提出来各种方法。以图 10.5(a)所示的物体与地板接触的问题为例,随环境与物体-机器人之间相互作用的区别,有针对搬运和装配作业的方法^[3,6,7],把物体举起,通过物体传递机器人之间力学相互作用的搬运作业方法^[9,19],多台机器人并非牢牢地抓取物体,而是仅仅围住物体用推进方式实现搬运操作的方法^[8],以及用绳子、棍棒等工具操作物体的

方法^[4,5]等。



(a)



(b)

图 10.5 多台移动机器人协调操作

至于构成协调系统时机器人的数量,可以分为两类:以 1 对 1 协调关系为基础的两台机器人控制系统^[14~18],和以 1 对多协调关系为基础的 n 台机器人控制系统^[6~13]。还有人研究了另外一种操作的方法,除了用到多台机器人以外,如图 10.5(b)所示,甚至人也参与到和多台移动机器人协调操作中去^[11,19],在推测人操作意图的基础上生成各个机器人的协调行动。

本节从上述方法中选取两种具有代表性的方法加以说明:第一种是用所谓的基于行为的 (behavior-based) 机器人,推动对象物完成搬运作业;第二种是用多台机器人抓取对象物,基于它们之间的力学相互作用完成搬运的协调作业。

1. 基于行为的机器人的协调搬运操作

首先根据 Brooks^[20] 和 Arkin^[21] 提出的基

于行为的方法进行各个机器人控制系统的设计。基于行为的控制法与基于智能体的行动决策法一样,都是属于典型的自下而上的机器人控制系统的设计方法之一。具体地说,方法以传感器信息为基础,从预先确定的行动要素(behavior)中选择应该执行的行动生成机器人的运动。这个控制法的特点在于容易描述反射行为,因此比较适合机器人学习,在环境适应性和容错性(fault tolerance)方面较强。所以,在多台机器人领域,它除了用于物体操作问题外,还适用于多机器人队形控制、机器人群研究等很多地方。

Parker^[3]在基于行为控制的基础上提出一种异构多机器人实现协调性和容错性的协调操作方法。该控制系统定义了若干个动作决定模块,由优先级决定行动。如把机器人全体应该执行的行动定义为行为集(behavior set),把外界传感器信息传来的瞬间机器人全体应该执行的行动定义为动机行为(motivational behavior)。不过,不同的机器人选择的行为集可能有所不同,但行为集具有改变优先级的功能,即通过各个机器人之间简单的通信协议,能取得同一瞬间其他机器人的行动信息,使各个机器人之间如同具有相同的行为集一样。凭借这样的功能,人们实现了多台机器人在地板上既下压又前推物体行进的协调操作。

在上述方法中,由各个瞬间机器人的状态和外界传感器的信息,以及来自其他机器人的通信信息决定机器人的行动,生成该瞬间各个机器人应该采取的行动。该方法的优点在于某个机器人的故障或作业失败对搬运作业整体不会产生很大的影响,搬运得以继续进行,比较容易适应参加作业的机器人数量的变化或环境的变化,不会影响搬运作业本身。其缺点是作业无明确的物理模型,因此如果作业的设计要求更高、更复杂就有点勉为其难了,如对施加于物体的力(内力)加以控制,或者在操作中保持物体正确的位置和姿态等。所以,该方法目前开展的研究都限于机器人之间力学相互作用较弱的场合,如向箱子施加压力等准静态作业问题。

2. 领导者·跟随者型协调控制系统

人们提出了很多有关机器人举升物体、

抓取物体这些利用物体中介在机器人之间产生的力学相互作用来实现搬运作业的方法。在这里,我们特别举出完整约束移动机器人的领导者·跟随者型分布协调控制系统^[9]。领导者·跟随者型协调在多机器人协调战略中具有代表性,由于此时机器人之间行动的依存关系十分明确,因此它体现出协调控制系统设计简单的优点。在这样的协调控制系统中,虽然既用到彼此之间的通信,也涉及传感器信息,但在此我们省略通信问题,仅讨论借助于传感器信息的协调操作方法。

该方法中将仅仅把物体运动轨迹传给领导者机器人,而剩下的所有跟随者(机器人)则推测领导者下达的目标轨迹,与领导者协调实现物体的操作。再进一步进行简化,我们仅考虑两台机器人的协调控制问题。首先各个机器人在物体上代表点的周围以机械柔顺特性受控。即机器人上作用外力后彼此产生的运动误差是能够被吸收的。该方法中机器人应该持有力觉传感器,根据力觉传感器得到的信息,以软件来实现机械柔顺。

假设物体代表点周围的目标轨迹是由领导者给定的,领导者根据这个目标轨迹生成运动。领导者的运动向跟随者施加力和力矩,后者由此产生运动。再假设被操作物体无惯性力等外力作用,在稳定状态中,领导者·跟随者的运动误差达到平衡状态。同时,假设领导者和跟随者有同样的柔顺控制特性,能用跟随者运动误差的2倍来计算推测误差(即跟随者推测领导者目标轨迹所必需的两者的目标轨迹差值)。

用这个被设计的推测误差来推测由物体代表点给定的领导者目标轨迹,设计传递函数,再根据跟随者自身的信息,我们就能够推测出领导者的目标轨迹,实现对单一对象物的协调操作,即使不利用机器人之间的通信也无妨。实际上,基于假想领导者的概念,本方法能简单地扩展到两台以上跟随者的协调控制系统,利用机器人之间的力学相互作用实现物体的协调操作。

随着机器人技术的进步,机器人的能力也提高了。但一涉及机器人协调,往往不得不考虑诸多的问题,例如,物体的内力、负载分配、运动规划等。特别是在移动机器人协调的场合,必须考虑移动中无法避免的地面

与车轮之间的滑动控制,另外,如果要操作各种形状的物体,还需要考虑机器人与物体之间的抓取点的关系。所以,机器人的协调控制问题不单单是控制理论的应用问题,还必须考虑机器人彼此之间的力学相互作用以及环境与机器人之间的相互作用等各类复杂问题。

平田泰久 王志东 小菅一弘

10.4 群体机器人系统

10.4.1 群体机器人系统的定义

根据作业性质的不同,在有些场合多个具有一定程度功能的机器人协同作业比起单个机器人来,能显示出功能更全、效率更高的优点。例如,在单个机器人操作大物体有困难的场合、收拢散乱在空间里的杂物的场合、大型机器人难以进入的狭隘空间的场合等。采用多机器人共同作业的系统称为“群体机器人系统”。

群体机器人系统的控制策略大致可以分为集中管理式和自主分布式两种。集中管理式是由人或监管机器人对全体信息进行一元化管理,然后把行动的决定传达给各个机器人执行的控制方法;自主分布式是让各个机器人具有一定程度的自主性,分布进行控制的方法。

集中管理式控制策略能发挥各个机器人的能力,这种策略适合整体效率的优化。其缺点是一旦监管机器人或通信线路出现部分故障或误动作,就会导致系统整体停顿或故障,所以系统可靠性的保证是一个问题。另外一个问题是随着机器人台数的增加,各个机器人的感知信息和对应感知信息的行动模式的组合数量也随之增多,这就加大了从中实时选择正确行动模式的难度。所以,越是控制多台机器人的系统,自主分布式控制策略越有效。

在自主分布式群体机器人系统中,各个机器人都是自主行动的,所以部分机器人的故障不会使系统整体停止或出现问题,从这个意义上说系统的可靠性比较容易得到保证。它还有一个优点是机器人的增减都很方便,能增加系统扩展或缩小的柔性。有关这方面内容的重点课题是研究充分发挥系统整

体功能的个体机器人的构成形式。但是,随着群体机器人系统性质的区别,比如,同构或异构、简单或高级、分担任务或不分担等,面对的设计任务都不同。正因为如此,目前尚未形成有关处理群体机器人系统的统一的理论体系。群体机器人系统的解决方法眼下都是针对个别问题提出的。

10.4.2 自主分布式群体机器人系统的分类

构成自主分布式群体机器人系统的机器人台数大致可以分成少数、多数,如表 10.1 所示。

表 10.1 自主分布式群体机器人系统的分类

	系统规模	性能/能力	作业任务分担
意图的协调	少数	高级	有/无
创发的协调	多数	单一	无

前者的特点是由少数高性能机器人构成。在该系统中作业可以同等分担,但是更多地是按照机器人性能的区别来分担任务。这种协调形式在系统控制上强调机器人之间的密切交流、智能决策,以及依据学习理论实现意图协调等。

后者属于能在蚂蚁、蜜蜂一类社会性的昆虫群、鱼群中观察到的群体行动系统。它的特点是由大量单一功能的机器人组成。组成系统的机器人通常是同构的,作业进行同等分担。这种协调的形式一般与群体智能(参见 10.4.4 节)有关,它们的协调称为创发性协调(参见 10.4.4 节)。

10.4.3 群体智能

鱼群、鸟群是由个体聚集起来的集团,它们有时会以集团的形式如同一个智能生物那样采取统一的行动。这种集团智能被称为“群体智能(mass intelligence)”。由于蚂蚁、蜜蜂等这类社会性的昆虫群体(swarm)具有群体智能,故它们被称为智能群体“swarm intelligence”。

人们对微型机器人未来在应用方面的期待其实不在性能上,而在廉价和大量的使用上。此时,即使少数机器人做着无用的动作,仍然应该考虑如何发挥“群体”性能的控制,

即群体智能研究和群体机器人研究,与大量机器人组成的自主分布式群体机器人系统的研究有特别密切的关联。

从事群体机器人研究时,用来判断发挥群体智能的作用的标准是“个体无法胜任的作业,是否能由集团(群体)来完成”。

分布式机器人系统是由 N 台机器人构成的,以非集中控制、非同步的方式从事有用作业 $W(N)$ 的系统。该系统只有 N 比临界值 N_c (>1) 更大时才能产生动作。群体智能是这个系统整体表现出来的特性,并且只有机器人数量 N 超过临界值 N_c 后才能表现出来。

这是群体智能的基本特性。

这是为了定量考察群体机器人系统时发现群体智能而提出的定义,与物理系统的相变很相似。虽然它不如相变那样激烈,但如果在有效作业量与单元数之间存在非线性关系的话,可以以发现的群体智能作为群体机器人系统行动评价的指标^[2]。

10.4.4 创发协调

给“创发性(emergence)”下定义很难,它主要有两种解释:一种解释是“由自主行为个体(单元)彼此,或者它们与环境相互之间的局部作用产生全局秩序,再用这种秩序约束个体的行为,在这种互动过程中获得新功能、性质、行动”^[3]。这样的解释很适合群体机器人系统的研究。另一种解释是“将熟知的子系统组合起来,引发出未曾预想的现象”。如果是这样,那么在现象被阐明后(使其合乎预想)其创发性就丧失殆尽了。上面第二种解释与迄今有关还原论(分解系统,了解各个子系统即可弄清楚其全貌)的反题有相同之处。

从前一种解释出发,我们可以将创发协调的自主分布式机器人群体系统理解为:根据局部信息行动的机器人群体,是一个可以由创发性显现出整个群体智能的系统。但是这种解释并未阐明各个机器人的行动与系统整体宏观行动之间的理论关系。

为此,大多数群体智能的研究都采取首先决定各个机器人的行动要素,再通过仿真确认是否出现整体行动的协调方法。在群体智能仿真中,C. W. Reynolds 的 boid (bird-oid,鸟仿真的缩写)^[4]和 Mitchel. Resnick 的 Star-Logo^[5]却很有名。但他们评价是否显现

群体智能的方法却很模糊,更多地依赖人的感性认识,因此很难不让人怀疑“研究者在任意地进行问题的设定”。群体智能的研究者必须回答“是否为了顺利求解问题而主观臆造了一个系统”。有一个方法,即遗传算法现在经常被人们拿来尝试解决搜索创发举动。另一个方法的根据是自组织的临界性(self organized criticality)^[7],即由于临界性,系统一旦到达混沌,就会出现自我崩溃,在这样的系统中实现有效举动的“混沌的边缘(edge of chaos)”具有稳定性。

群体智能的搜索算法还可以举出基于群体动作的积极反馈特性的蚁群算法(ant colony algorithm)等^[6]。

10.4.5 创发协调设计的可能性

如前所述,在群体机器人系统创发协调的研究中个别事例的研究占有主流的位置,而且大多数采用自下而上(归纳的)的方法。研究发现,实现创发的协调条件在很多例子中都是一致的,即:

① 各个机器人应该能够理解空间场的状况。

② 机器人之间建立相同的概念。

③ 学习占有重要的位置,对交流的要求相对比较宽松。

④ 开放式系统,在机器人与外部环境或机器人与其他机器人之间存在信息流。

⑤ 有自组织功能,其过程经历为生成、评价、选择、消灭四个阶段。

⑥ 机器人从内部观察系统,独自获得自己周围的模型。

这些条件意味着有关自主分布式群体机器人系统设计方法的理论体系是有可能建立起来的。

“给定群体机器人系统整体的功能和作业要求,设计单个机器人的行动是困难的”。有人认为,这个特点不是群体机器人系统特有的,而是自主分布式系统通常所共有的^[8]。为了描述同一个物理量在空间中大量分布的一类系统的行为,有人建议按照反应扩散方程式建立时域发展方程式系统,并在函数空间进行分析和设计^[9]。人们希望建立起一个理论体系,当系统整体给定功能和目的后,该理论系统能指导设计活动,确定系统中各个

子系统(各个单元)应有的性质和行为。

汤浅秀男

10.5 分布规划

10.5.1 分布规划问题的分类

许多领域都涉及分布规划问题。在这里我们关心两点,并按此加以分类:①作业目标的维数,按照作业目标的维数进行分类,并关注目标状态是用机器人某个给定的构形(点)来描述,还是用某个区域内的包络(面)来描述;②作业的多样性,分为处理单一作业,或者处理若干个基本作业的复合作业。综上所述,分布规划问题可以划分为如表 10.2 所示的 3 类。下面我们分别讨论每一类的情况。更详细的说明可参见文献[1]。

表 10.2 分布规划问题的构造

	单一作业	复合作业
点目标	动作规划	作业规划
面目标	搜索·扫描规划	

10.5.2 动作规划技术

这里所谓的动作规划是把传统的动作规划概念,即“导出从初始构形到目标构形的机器人避障移动路线”扩展到群体机器人系统中去。不过,在群体机器人系统的场合,除自身外,其他机器人都转变成了移动障碍物,因此规划的问题变得更加复杂化。

一个直接的方法是把全部机器人合在一起视成一个超多自由度的机器人来决定其动作规划。即把构形空间的维数等同于机器人的台数,在该空间中求解动作规划的问题。Hopcroft 等认为从区域计算量的观点来看,该问题相当于 PSPACE-困难^[2],机器人台数越多意味着越困难。与此不同,有人认为若将概率概念引入探索,可以把问题转化为一般的动作规划算法,很适合多台机器人系统应用。比如,随机势场法^[3]、概率路标法等^[4]。

另一种方案提出在规划每个机器人的动作和实际动作时,若存在相互碰撞的危险性就进行局部调整的方法。

其中之一采用速度调整法,按照以下步骤进行规划:①各个机器人先无视其他机器人进行路线规划;②各个机器人以一定的速

度进行动作,若机器人之间发生干涉危险,则通过调整各个机器人速度达到回避干涉的目的。图 10.6 的作业完工图给出了一个例子^[5]。两台机器人先分别决定轨迹,再以线段长 S_1 、 S_2 为参数将轨迹展开在二维平面上。各机器人初始构形对应于左下方,目标构形对应于右上方。如果机器人在获取自身构形时发生了干涉就把单元变成黑色,不干涉就是白色,结果得出沿右上方行进的初始、目标构形路线(粗线)。这条轨迹表明机器人的轨迹是不可逆的。

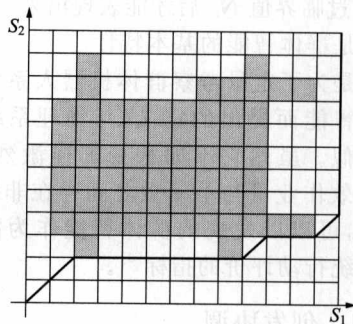


图 10.6 作业完工图

有人提出对每个机器人设定优先级的所谓优先级法。即对某个机器人规划动作时,可以把比自己优先级高的机器人视为移动障碍,而无视比自己优先级低的机器人。这样问题就转化为在与机器人台数相当的移动障碍物环境下求解动作规划的问题。有研究指出,面对装配问题时设定物体之间的优先级比较简单,上述方法会比较有效^[6]。也有人建议将设定优先级的方法修改成在机器人面临干涉危险状态时动态地设定优先级^[7]的方法。

有人建议对机器人动作的适当性制定一套规则来实现彼此的规避。这又可以细分为三种:控制理论法或数理方法(优化方法决定机器人的行动)^[8]、基于传感器的规划方法(用简单规则保证到达目的地的可能性)、试探方法(基于先验知识决定行动规则)^[9]。例如,在试探方法中有人提出一种基于交通规则的方法^[10]。也有人提出人工势场方法,它是在各个机器人与目标构形之间、相互接近的机器人之间、相互接近的机器人与障碍物之间加进所谓的虚拟弹簧或阻尼器,通过适

当调节它们的参数来解决动作规划的问题^[11]。

10.5.3 搜索与扫描规划技术

这是具有一定尺度的机器人覆盖某已知区域的问题(图 10.7),或在未知环境中开展区域搜索生成地图,或查找物体的问题。它大致分为反射型和熟虑型。

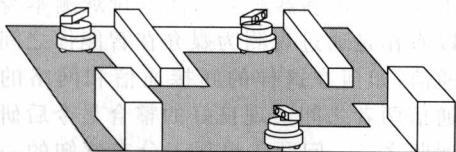


图 10.7 搜索与扫描规划问题

所谓反射型方法指各个机器人以随机行走等反射行动在概率意义上实现作业区域的覆盖。据此开展了两种具体的研究:一种是在多台机器人之间引入简单呼叫通信,研究考察作业的效率^[12];另一种是让群体机器人遵循“碰撞就返回”的简单行动规则,逐渐增加机器人的台数,研究考察机器人覆盖区域效率的变化^[13]。所谓熟虑型方法是根据扫描对象区域的地图信息,规划某种指定的路线覆盖区域。为此有人建议其具体的执行步骤是^[14]:①把扫描对象区域用“骨骼线”和“平移的轮廓线组成的曲线群”加以分割;②根据通过曲线部分的全部路径,即满足题目要求的路径解的原理,利用图形学理论的一般公式(即邮差问题)推导一次循环的路径;③按每个机器人将所得路径进行分割。这个方法的特点是在已知区域条件下可以实现高效扫描。如果区域的外部形状未事先给定,那么熟虑型方法应按照下面三条建议进行循环搜索^[15]:①用均一单元分割作业环境;②各个机器人搭载距离传感器识别外界,将自身附近的可感知区域分为自由区域单元、未知区域单元、障碍物区域单元三种;③提取自由区域单元和未知区域单元边界所围成的区域(称为开拓区域),把下一个观测点设定为该区域的重心,让机器人向其移动并观察行动的效果。后来有人改进了这个方法,即在设定下一个观测点时,根据下一个点的成本和观测点所在的观测区域避免不同机器人重复搜索同一区域的方案^[16]。

10.5.4 作业规划技术

人们在分布人工智能领域对多智能体系统作业分配的问题曾经开展了很多讨论^[17],目前,涉及智能体系统实体的协调体系结构的研究逐渐多了起来。首先针对两台机器人的移动和搬运作业,有人提出契约网络协议的概念。它的含义是:①领导机器人把给定作业的实行规划分配给其他机器人;②基于扩展的事件库的协调协议,以 petri-net 的形式描述各个机器人的行动准则,再进行相互调整;③各个机器人根据最终协议实行作业^[18]。自主分布式群体机器人系统也同样在开展根据契约网络标准进行分布作业分配的研究^[19]。

能够快速、实时地执行多个作业任务的分布式机器人体系结构也被提出^[20]。依次已经实现了多台移动机器人在未知环境下搬运大型对象物的作业。群体机器人在移动中动态地考虑环境状况,实时分配作业任务的实验也获得成功。人们正在设法利用公式表达作业要素的重要程度与时间的关系,基于线性规划的作业分割方法,以便加快作业分配的效率。

太田 顺

10.6 分布感知

分布感知的研究早期始于多个雷达等传感器追踪目标的应用背景^[1]。此时的任务是如何整合从广域采集来的多个雷达信息,正确、快速地追踪目标飞机,即主要应用于军事目的。实际上除了雷达,在海洋也有利用分布的超声波传感器系统对船舶进行识别和追踪的应用。

以这样的背景起步的分布感知的研究,以及近年来由摄像机组成的分布感知系统,从分布系统的角度看,它们主要具有如下4个共同的基本问题:①多传感器的信息整合方法;②不同传感器发送的信息在时间上的匹配方式;③多传感器分散工作的方法;④多传感器信息决策算法等。

10.6.1 多智能体的分布感知

如果将各个传感器视为智能体,那么分布感知问题就可以当成分布人工智能或多智

能体的协调问题来处理。其中,具有代表性的研究成果是 Durfee 和 Lesser 提出的 Partial Global Planning^[2]。他们提出了解决分布感知基本问题的标准问题^[3],即让传感器群的部分观测范围重合,对汽车进行追踪,来尝试解决问题。其中的一个尝试就是 Partial Global Planning,在这个尝试性研究中,他们将多个智能体自身观测到的局部信息与通信传来的附近智能体的全局信息整合起来,在各个智能体分担的局部区域里实现了更准确的汽车导航。

10.6.2 分布视觉的感知

在多智能体研究之后,近年来多摄像机的分布感知系统成为研究的热点。事情的契机源于美国国防部的计划 VSAM(video surveillance and monitoring),此后,将多摄像机连成网络,构成监测环境和人类行动的分布视觉系统的研究变得如火如荼(相关研究的成果报告发表在 International Conference on Computer Vision,以及 International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 等国际会议论文集中)。VSAM 的分布感知研究以摄像机为传感器,除了摄像机的标定问题外,还涉及将摄像机视为智能体的协调等诸多相关问题。

在 VSAM 之后,日本也开始了多摄像机分布感知的研究。例如,石黑提出了分布视觉的概念^[4],他用多台摄像机搭建了一个多移动机器人的导航系统。松山等得到 1996 年日本学术振兴会未来开拓学术研究推进事业的资助,立项开展了分布协调视觉课题研究,其任务是以生成图像的形式有效地理解具有主动视觉功能的智能体群的动态状况^[5]。研究中他们建立了一个系统,即通过多个视觉智能体的协调行动来识别人的行为,以便加强对动态状况的理解^[6]。

10.6.3 分布视觉的基本问题

基于视觉分布感知的分布视觉研究,有以下必须解决的基本问题^[4]:

① 多摄像机的定位问题和摄像机之间的物体对应问题。

② 摄像机观测所得的非显式通信和网络带来的显式通信的关系问题。

③ 环境建模问题。

④ 多摄像机智能体的动态组织问题。

问题①是传统机器视觉中立体视觉问题的扩展。由于有大量摄像机安置在环境的各处提供信息,人们相继发现了几个不同于以往立体视觉研究的新算法,所以事实上解决这个问题已经不存在困难^[7]。问题②是分布感知中相当有趣的挑战,不过人们迄今为止尚未涉及。传感器对某物体进行观测本身也可以看作是观测为媒介在智能体之间进行通信,如何在这样的间接通信和网络的直接通信两者之间实现良好的整合是今后研究的课题之一。问题③也属于分布感知的一个重要的基本问题。迄今为止,在分布传感系统中通常采用的方法是将信息汇集到网络上的 1 台或多台计算机上进行分析。如果传感器的数量十分巨大,那时为网络信息流建立环境模型就变得十分必要了。对分布感知系统而言,始终都需要面对问题④,如果系统十分复杂,那么就目前分布系统自组织的水平来说仍无法满足实用的要求。这也是今后一个寄予期待的研究课题。

10.6.4 展望

计算机网络在迅速发展,摄像机等传感器的价格在逐渐下降,因此今后肯定会有很多传感器进入家庭或亮相街头为我们的生活提供服务。这种趋势无论在实践方面还是在理论方面都会对分布感知的研究产生非常重要的影响。虽然开发大量传感器的应用系统仍然不免会遇到困难,但这些困难已经变得微不足道了。今后我们期待会有更多的研究人员参加到相关的研究行列中来,而分布感知系统的发展趋势很可能成为计算机网络的一种新形态,或者成为环境与计算机网络结合的一种新接口。

石黑 浩

10.7 环境智能化技术

从技术上说,机器人自身的智能化、自主化并不是一件容易的事情。因此,一个现实的方法就是在不断开发机器人自身智能和自主水平的进程中,同时开发机器人动作环境的智能化和自主化技术。实际上,虽然环境中并无机器人,但是把环境自身机器人化,把

环境改造成能感知、识别在其间行动的人及其状态,并据此做出决策和行动的系统的开发正在进行中。在本小节里,我们来介绍与此有关的环境智能化技术。

在当今计算机技术和网络技术的背景下,利用环境智能技术来构建一个分布系统已经变得不那么困难了。特别应该提到的是近年来泛在计算技术的迅速成长。泛在计算技术是 Mark Weiser 提出的,意指计算机(环境)随处(遍在)可在^[1]。它本来的概念与其说是计算机和网络无处不在,不如说是我们身边的器物和环境到处都嵌入了计算机,它们根据需要进行通信,动态地组成网络,同时为我们提供极其便利的计算机服务环境。

实现泛在计算技术的种子技术包括:①以 PC 机和互联网为核心的网络技术的快速普及;②电话(含移动电话和 PHS)和电话网(含 ADSL);③有线电视;④基于电磁感应或电磁波的非接触通信技术开发出来的信息记忆媒体(RF-ID、数据载体、IC 标签、ID 标签等),这一点最近十分引人注目;⑤将信息处理功能、传感器、执行器等连接起来的所谓微服务器设备和特定网络技术。最近,一种专门命名为信息家电(或网络家电),供家庭环境内部应用的环境智能技术正在快速增加,它们的特点是,一端连接到家庭网络、互联网(正在推行 Echonet 等标准),在另一端靠外部终端或移动电话即可访问。最近,针对这一类家电开发的环境智能化技术的研究报告大量问世。

作为机器人学的研究领域有自主分布式机器人系统,作为分布感知的研究,在环境中配置多台摄像机和传感器,将以上两个研究协调起来检查、识别及测量环境内移动的人 and 对象以及它们的动作和状态。最典型的研究对象是房间智能技术,即所谓的智慧房间、机器人房间、智能空间等。研究的主要目的是向房主提供各种服务,如提供医疗、康复、护理领域的服务,以及安全领域的服务。

移动机器人等移动体在复杂的动态环境中自主动作时,把环境智能战略用于机器人识别环境信息的手段是最有效的。尽管机器人搭载的视觉等传感器对环境和对象的识别所能达到的技术水平还有限,但是如果在环境(地板和墙壁等)和器物(障碍物和对象物)

中嵌入上述 IC 标签、微服务器等设备,发挥它们对局部或动态环境信息和器物固有信息的储存及管理功能,并把相关信息送到局域网上,就能够让机器人获取更多的信息。

在多台机器人协调动作时这个战略也特别有效。在环境和器物内嵌入上面列举的设备,把机器人所获取的环境或器物的相关信息和知识写入对应的场所和器物中,像蚂蚁的荷尔蒙或动物的标志行动那样,让其他机器人能够读取和利用这些资料,那么甚至根本无需广域通信手段无线 LAN,就能实现信息和知识的共享,实现群体的有效行动。

下面我们来介绍几个环境智能化的具体技术和应用事例。

10.7.1 智能数据载体及其应用

由于受到识别、动作规划等技术水平的制约,开发在环境中自主移动和作业的机器人是一件比较困难的事情。所以,人们在提高机器人自身智能的同时,从系统的角度也对机器人动作所涉及的环境进行了智能化改造,智能数据载体(IDC: Intelligent Data Carrier)即是这种开发的成果之一^[2]。

IDC 是一种内部带有 CPU、内存、局部无线通信单元等的小型信息装载/处理设备。把它嵌入环境的各处或器物中,在分散的局部场所或物体中实施信息分布管理,就把这些场所、器物改造成有智能的,或者使其成为智能体了。在机器人上搭载 Reader/Writer 装置,通过局部非接触通信与处于机器人自身附近的 IDC 进行信息交换,机器人就能自主地获得身边环境的信息(比如,地图的详细信息、交通堵塞的动态信息等),根据场所和对象物实现智能的、柔性的、有效的自主动作和协调动作(图 10.8)。于是机器人不必依靠广域无线 LAN 通信,只需把大量埋入 IDC 的环境当作信息基础结构来利用,同时完成合理的动作。另外,机器人还可以向 IDC 写入知识和信息,允许其他机器人读取这些资料,就像蚂蚁的荷尔蒙那样,机器人通过环境可以间接、方便地实现信息交换。通过上述形式对环境信息和知识的自主存储与利用,多台机器人即能够完成行动的层创进化,以及与环境的共同进化。

迄今为止,已经有几种类型的 IDC 被开

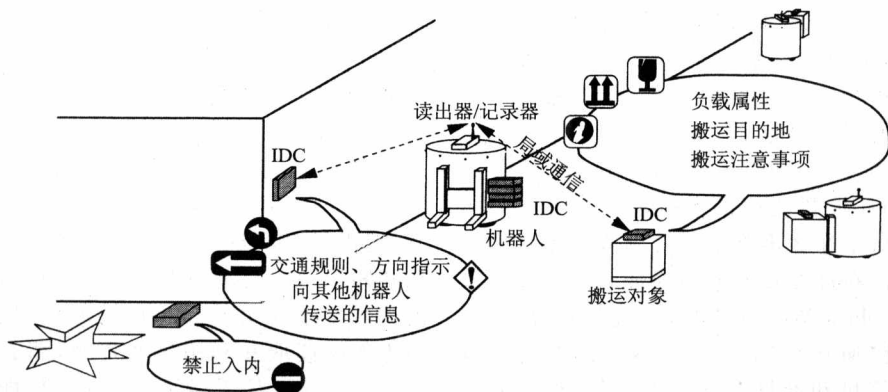


图 10.8 智能数据载体 IDC 的概念

发出来,并且得到应用。图 10.9 是长距离通信 IDC ver. 4(PIC,内置 Li 离子电池外形尺寸为 $111\text{mm} \times 63\text{mm} \times 15\text{mm}$ 、重量为 75g、存储容量为 68byte、通信速度为 1.2Kbit/s、通信距离为 5m),它可以按照要求的功能变更 PIC 内部程序,读出/写入任意数据。内置太阳电池的室外应用型 IDC 也已经问世。人们把这种 IDC 埋入墙壁、障碍物环境、等待机器人操作的物体内部,实现了移动机器人的任务分布管理、未知环境协调搜索(图 10.10)、自身位置辨识、室外地图信息管理等功能。

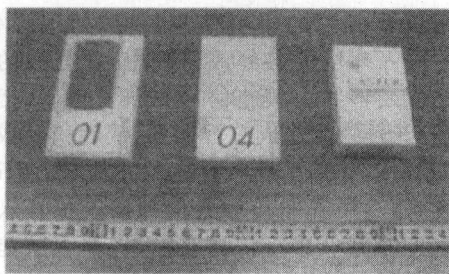
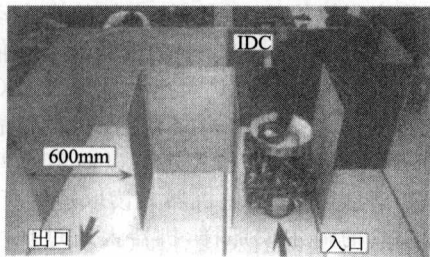


图 10.9 IDC ver. 4

图 10.10 机器人未知环境探查的应用举例
(东京大学)

搭载了扬声器和话筒的受灾者搜索救援用 IDC,具有钻入瓦砾,靠外部启动信号自主

发出呼叫或将受害者的声音录音的功能。用于实验动物等个体管理的超小型 IDC(图 10.11)已经问世(12bit CPU、无电源、尺寸为 $5\text{mm} \times 6\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、重量为 0.2g、存储容量为 1Kbit、通信速度为 4Kbit/s、通信距离为 20mm)。把它植入对象体内,将基因信息、系统信息等的个体信息写入 IDC 可以为实验动物的管理提供方便^[3]。如果用户把自己的特征信息写入 IDC,带在身上出行,需要时读取信息下载到有关的机械系统中,就能为构建适合老年人或残疾人机器系统提供方便(图 10.11)。

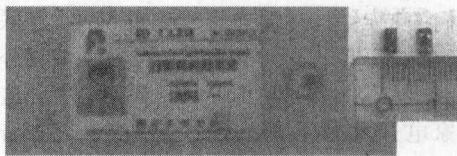


图 10.11 实验动物管理用超小型 IDC

目前,基于传感器感知功能和执行器动作功能的智能数据载体正处于开发阶段。IDC 十分小巧适用,所以人们期待它能进一步扩大应用。

浅间 一

10.7.2 机器人房间——环境型机器人

1. 环境型系统和环境型机器人

制作机器人的方法大致可以分为集中式和分布式。拟人机器人和宠物机器人都属于集中式方法的典型例子;而将传感器(群)和执行器(群)在空间分布配置构成系统的方法属于分布式方法的例子。它们组成了统称为环境型系统的一个新领域。

以往关于环境型系统的研究有智慧房间(smart room, 把房间建成信息媒体的终端)^[5]、智能房间(intelligent room, 致力于房间的智能化)^[6]、宜居(easy living, 室内环境具有操作系统的功能)^[7]、安全家居(房间具有守护安全的功能)^[8]、认知家居(aware home, 大量埋入传感器)^[9]、中枢家居(neuro-house, 靠神经网络支援的多功能家居)^[10]等。

环境型机器人应该具有更明确的执行意识, 它的研究内容包括智能空间(多台机器人在空间分布配置)^[11]、机器人房间(房间自身就是机器人)^[12]等。环境型机器人是将机器人单元分布配置在人所处环境周围的一种空间系统, 其特点是: ①属于空间系统; ②是与人共存的系统; ③分布式系统。

在室内空间(房间)建立环境型机器人的例子已经很多了。这样的应用受到大家注目的理由大致如下: ①以人为本。房间原本就是为人服务的, 建成环境型机器人后更是如此。其结果是: 服务的内容十分明确; 活动空间让主人感到自然、轻松, 所以应该着力营造一个为人的长时间行动提供宽松的测量和支援的环境。从这个意义上说, 房间就是一个人们共同活动的身心愉悦的场所。②人所置身的空间。房间是全方位的包围人的空间。这就为在上方(天花板)、下方(地板)、侧面(墙壁)分别布置传感器和执行器, 全方位获取人的信息提供了绝佳的条件。换言之, 为构建空间分布式机器人系统创造了条件。通过适当组合分布式机器人的各个单元就可以构筑一个合理的支援机器人。③三维空间。虽然房间是立体的, 不过人却在地板上, 即二维空间进行活动。换言之, 人类基本上是靠地板等平面赖以生存的, 只在某些场面将生存的形态扩展得更大。这意味着人弃置不用的空闲场所在房间中随处可见, 它们在配置机器人单元时都可以派上用场, 而丝毫不会妨碍人的正常活动。从这个侧面上看, 构建自然、长期的与人共存的系统并非难事。进一步, 甚至还可以构建一个既利用空闲场地测量人和机器人的位置, 又与之互动的空间系统, 即所谓的人与机器人共存的空间系统。

2. 机器人房间的实现形式

下面提出几个房间型环境机器人的具体

例子, 介绍它们的实现形式和智能水平。机器人房间应该属于人类生活的隐形的守护神, 只是在需要的时候伸出援助之手, 其概念由图 10.12 给出。

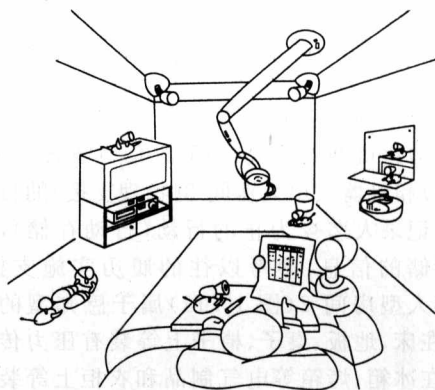


图 10.12 机器人房间的概念

1) 机器人房间 1

健康人一旦患病行动就变得不自如了。机器人房间的第一个版本建立在机器人协助人解脱不自由的基本理念上, 1997 年就实现了这样的理念(图 10.13)。该系统所具有的功能是: 床垫下铺设的压力传感器阵列测量人的呼吸(但不会给患者带来任何不便^[13])。天花板上的摄像机提供视觉, 猜测病人手指指向的器物, 再借助于墙壁上的长臂机械手(long reach manipulator)把它取来送到身边。甚至可以选择娱乐机器人的舞蹈节目^[14]。上述功能充分发挥了机器人房间所具有的空间系统的特点, 通过在人的周围空间配置机器

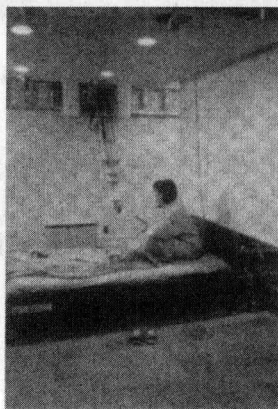


图 10.13 机器人房间 1——机器人病房
(东京大学)

人单元,以人或机器人的行动为媒介,实现人与系统在无侵害条件下的信息交换。具体地说,就是为了实现人与机器人之间信息传递的目的,在行动媒体智能的水平上对人的行动进行理解。例如,通过患者呼吸的测量功能、行动表示功能,开展了机器人的行动表现的研究。

2) 机器人型房间 2,3

构建机器人单人房间 2(信息支援,1998 至今)和机器人单人房间 3(物理支援)的目的在于记录人迄今为止的行动(行动存储),根据存储的信息,参考以往的履历实施支援。机器人型房间 2(图 10.14)属于感知型的房间,在床、地板、桌子、椅子上等装有压力传感器,在冰箱、烤箱等电气制品和衣柜上等装有开关,构建了基于传感器的分布对象感知网络^[14],实现了传感器群对人的生活行动长期不间断地进行测量,建立数据库系统^[15]。人们正试图开发一种索引技术,即从这个庞大的数据库信息中提炼出重要信息,提示给事主。这些研究都与环境系统中的人-机器人共存系统有关。

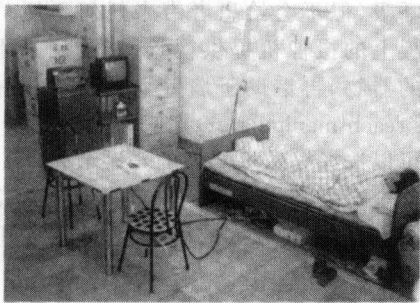


图 10.14 机器人型房间 2——单人房间公寓型
(东京大学)

机器人房间 3 所能胜任的功能是移动机器人能够根据人体态的区别和护理动作要求改变高度^[17],或者移动机器人能够随寝床按照生活节奏改变姿态协调动作^[18]。这些功能都发挥了分布系统的特点。即在机器人房间 3 中对传感器、执行器,特别是执行器分布做了更加周到的安排,使之越发合理、可靠地为主人服务。

3. 环境型机器人系统的拓展

至于今后信息处理的发展趋势如何?一

般认为泛在系统具有方向性的意义。这种系统提供信息的特点可以归纳成 5W1H-ever,即任何信息(whatever)、任何时间(whenever)、任何地点(wherever)、任何人(whoever)、任选类别(whichever)、任何形式(however)。

下面我们以此为基础讨论环境型机器人系统的拓展方向。关于 wherever(任何地点),要求系统在房间中具有高度分散性,无论何处都能得到支援。关于 whoever(任何人),将服务的对象从传统的患者拓展到持有不同个性的对象,满足个性化需求的功能,即向适应特定功能的方向拓展,这在技术上对今后开发个性化的设备或个性化的产品来说占据特别重要的地位。关于 whenever(任何时间),是要求能够存储行动,所谓存储行动就是将时间轴延伸至以往的信息,达到能够储存个人资料,利用以往经验的水平。这一项是至关重要的,这是因为个人的资料将不再限于医疗康复范畴,还事关人的尊严和私密性,显然它与 whatever(任何信息)所涉及的安全性有密切的关系。关于 however(任何形式),应该理解成环境型机器人系统追求与各种媒体的整合,包括把行动也视为信息媒体。

佐藤知正

10.7.3 智能空间(空间智能化)

1. 何谓智能空间

所谓智能空间是指通过各种传感器捕捉空间内的状况,经网络传至计算机或机器人加以智能处理,为人们提供恰当的服务的空间^[19~24]。这样的过程被称为空间智能化。

在智能空间中原本就带有局部智能的机器人,那么它与智能空间相互作用会越发提升智能的程度。人们甚至能够从理解手势的空间和机器人那里得到更加有效的支援。图 10.15 表示了有关的概念。在图 10.15 中,分布感觉智能网络设备(DIND; Distributed Intelligent Network Device)在摄像机、话筒的帮助下具有感知功能,并通过网络媒介的连接来处理智能空间内的信息。

通过机器人技术和虚拟现实技术等运用,智能空间可以给人以物理的和心理上的支持,提供便捷性、可靠感、安全性、满足感等。借助于 DIND,空间智能得以与物理空间、

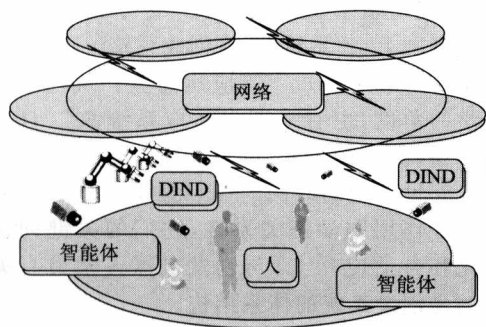


图 10.15 智能空间

数字空间融合,使之理解人的意图,能提供周到的服务。智能空间是以 DIND 为基础的,融合了各种技术的载体,是一个不断完善的平台。目前,移动电话、PHS、便携式设备等连接成的网络平台可以视为智能空间的一种形式。

2. 分布感觉智能网络设备(DIND)

1) DIND 的概念

在智能空间中,DIND的作用是把握空间的状况,通过机器人、显示屏、扬声器等对用户 provide 周到的服务。DIND 主要由传感器部分(获取信息)、运算部分(处理信息)、网络部分(交换信息)及电源部分组成,目前已经达到小型、廉价的水平。因为它以网络化为前提,所以高安全性、高自检性能、兼容性等是十分必要的^[24]。图 10.16 给出 DIND 的概念。它由传感器部分、运算部分、网络部分和电源部分构成,为了减小体积,应该采用 MEMS (Micro Electro Mechanical System)

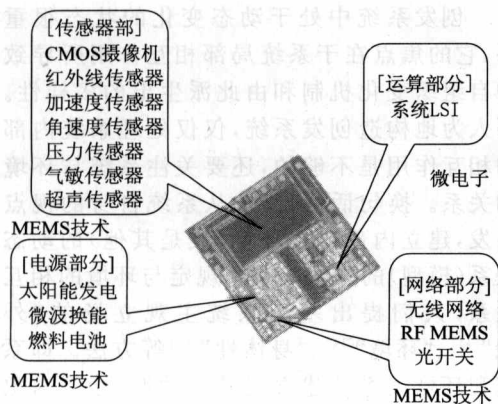


图 10.16 DIND 的概念

技术。

2) DIND 的基本功能

DIND 智能化的程度因其大小而异,不过将它网络化,在空间配置多个 DIND,自主协调,就能实现更高级的智能。

网络化 DIND 的基本功能如下:

① 空间状况的观测。具有使用各种传感器对空间内的状况进行观测的功能,例如,视觉传感器、红外线传感器、微波传感器、超声波传感器、高灵敏度的话筒、激光雷达等。

② 观测数据的高级处理。指就地处理观测数据,以及向网络传送任何种类的传感信息的功能。

③ 智能决策。基于网络化 DIND 信息,并结合以往数据推测空间内发生的新状况,完成合理的决策功能(由多台 DIND 在网络上共同完成)。

④ 提供周到的服务。对机器人或机械手发出物理支援的命令的功能。

3. 相关研究

如果我们仅从环境因素观察智能空间(空间智能化)的相关研究,可以举出机器人房间、智能房间、智慧房间、梦幻空间等^[21]。其中,苏黎士工科大学公开发表了他们从娱乐性的角度在 Swiss Expo. 02 基础上构建的“Ada-the intelligent space”成果。其间以摄像机、话筒、压力传感器为输入设备,再以 LCD 投影仪、发光地砖、音响效果为输出,实现与人的互动作用^[25]。另外,在建筑领域,让建筑材料自身带有智能的研究也已经启动了,这会让空间变得更加聪明。MIT 的建筑学科和媒体实验室共同参与了一项研究“Changing Places”,属于“The House-n”计划的项目之一,项目是在家居建材中埋入大量传感器,以极其自然的形态观察人的活动^[26]。从长远来看,这些研究将涉及空间与机器人学的融合,而智能空间(空间智能化)也将大幅度地改变人类的生活空间。

桥本秀纪

10.8 创发机器人学

机器人正在越来越走近人们的生活。很多企业开始销售宠物机器人和家庭机器人。宠物机器人接受主人对它的招呼或拍打,它

会理解其中的含义并做出一定的反应。主人拍打的动作不同,它的反应动作也各异。有的机器人能对数十种词汇做出反应。显然,如果仅靠重复呆板的反应,人们很快就会对它们感到厌倦。所以,也有一些新的娱乐方法出现,人们事先让程序能够随时间的推移变更应答的形式,或者是让传感器的组合更加复杂,使人们不至于一眼就看破反应的规则。

不过,宠物机器人应该再具有一些新的功能,如从机器人一侧对人做出某种行动,或者猜度人的反应。更具体地说,就是除了被动性的一面以外,机器人还应该具有主动性的一面,例如,对人采取独立的肢体动作。在被动、主动的反复过程中,人和机器人的关系随着时间的推移发生了角色转换。在这个过程中,人慢慢长大,机器人也必须逐渐成长。人作为一种环境,他与机器人之间的相互作用成为一种约束条件,促使机器人不断创发出新的功能,新的行动模式。随着机器人各自经验和环境使然,使其体现出独特的个性。当这一点实现之时,便是真正意义上的宠物机器人诞生之日。

10.8.1 功能的创发和系统

应该如何构造一个工学系统,才能让机器人达到功能创发的境界呢?

传统工学系统的目标是长期稳定的工作,始终维持相同的特性和生产效率。为此,设计师们都力图减小环境变化对系统的影响,构建所谓的健壮(robust)系统。反过来说,就是有一个潜规则:不把剧烈的环境变化作为设计对象,因为这样会破坏系统的平衡和稳定。

但是,20世纪80年代后期到90年代,以自主机器人、信息网络为代表的新一代人工系统层出不穷,它们都无法回避环境变化这个问题。另外,传统系统也变得更加复杂和庞大,长期维持一定的系统特性不变未必是一件好事。因此,人们开始认识到与其适应外部环境的变化,不如系统改变自身的特性和结构。换句话说,即使遇到设计阶段未能预测的环境,系统也必须妥善地加以应对。进入20世纪90年代以后,人们提出的一系列新的系统设计方法都是以突破传统系统的束缚

为背景的,结果在免疫系统、生物系统、生命系的基础上,超系统^[1]、自创成系统^[2]、自创生理论(autopoiesis)^[3,4]等应运而生。从物理和工学的角度,也有复杂自适应系统^[5~8]、自主分布系统^[9]、创发系统^[10,11]等新的系统设计概念问世。它们共同的焦点是系统组成单元的相互作用和动态关系性,它们的关键词是变化和自适应^[8,12]。与创发机器人学最有关联的是创发系统的体系结构。

10.8.2 创发系统^[10,11]

图10.17表示了创发系统的概念,Langton等将“创发”做了如下的定义^[10]。

“通过系统构成单元之间的局部相互作用,自下向上地发现全局规则,全局规则又反过来以约束条件的形式自上向下地支配单元之间发生的局部相互作用,在这种双向作用过程中获得新的功能、性质、行动等。”

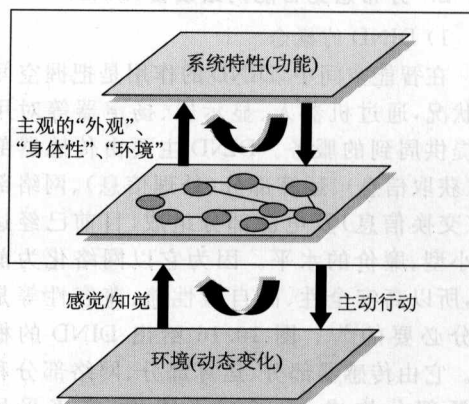


图 10.17 创发系统

创发系统中处于动态变化的状态很重要,它的焦点在于系统局部相互作用所导致的自组织变化机制和由此派生出的多样性。要人为地构造创发系统,仅仅处理系统内部的相互作用是不够的,还要关注系统与环境的关系。换句话说,要求从系统自身的视点出发,建立内部描述环境(或是其他)的动态关系(模型)的方法。为了规定与环境的相互关系,人们提出基于系统主观立场的“外观”^[13]、“环境”^[14]、“身体性”^[15]等方法。即系统和环境关系的建立就是被动性(接受对象施加的作用)和主动性(系统回应对象所发出的主观的、肢体动作)之间的相互反馈。

创发系统重视系统与所处状况和场所的相互关系。在追求普遍性的同时,也不忽视各自的多样性、多义性。所以,即使系统输入相同,只要状况和空间的变化不同,输出也会不同。或者说,创发系统重视状况或场所的变化过程,从系统对时间和空间的依赖性(环境依赖性)的角度来描述相互关系^[16~19]。

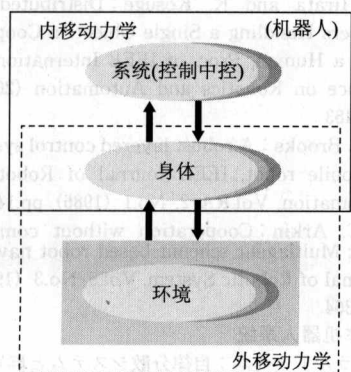
总之,创发系统与对象之间的关键是能以“相互反馈性和因果关系”来解释。它的焦点则放在顺应环境的不断变化,随时生成适当的功能方面^[20]。

10.8.3 创发机器人学

回忆一下当初我们学习棒球、网球、足球等运动项目时的情景。无论是谁,开始时总是关节僵硬,动作笨拙的。经过反复练习之后全身就自然了,人体与板、拍、球的动作就浑然一体了,身体各个部分的动作也得到了灵巧的控制。

类似地,让机器人自主获得运动和行动同样地也需要建立在与外部环境相互作用的基础上,需要把生成满足动态环境的新的身体动力学机制和基于它的时间空间运动模式生成机制嵌入到系统中。

以拟人机器人为代表的各种自主机器人的自由度很多,而且身体具有冗余的构造(感觉及运动机构)。此时,通过和环境的相互作用,身体与环境一起构成外部动力学,并以此定义环境(图 10.18)。



另外,身体也和系统(控制中枢)结合形成内部动力学。创发机器人学的关键一点就

在于发现一种方法,这种方法能够将系统(由内外部动力学构成)-身体-环境三者的动态关系调节和记忆到能够满足目的、任务要求的程度。这也是今后人们需要着力研究的最重要的课题。

伊藤宏司

参考文献

- 10.1 分布式机器人系统概述
- [1] H. Asama et al. eds.: Distributed Autonomous Robotic Systems 5, Springer (2002)
- [2] 長田正編:自律分散をめざすロボットシステム, オーム社 (1995)
- [3] 浅間一:マルチエージェントから構成された自律分散型ロボットシステムとその協調的活動, 精密工学会誌, Vol.57, No.12 (1991) pp.2117-2122
- [4] 浅間一:複数の移動ロボットによる協調行動と群知能, 計測と制御, Vol.31, No.11 (1992) pp.1155-1161
- [5] 油田信一:複数の移動ロボットの協調行動, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4 (1992) pp.433-438
- 10.2 可重构机器人
- [1] 木村真一, 奥山利幸, 高橋正人, 土屋茂, 鈴木良昭:冗長マニピュレータの故障適応の自律分散の制御アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.5 (1997) pp.433-440
- [2] Guilin Yang, I Ming Chen, Wee Kiat Lim and Song Huat Yeo: Kinematic design of modular reconfigurable in-parallel robots, Autonomous Robots, Vol.10 (2001) pp.83-89
- [3] Woo Ho Lee and Arther C. Sanderson: Dynamic analysis and distributed control of the tetrobot modular reconfigurable robotic system, Autonomous Robots, Vol.10 (2001) pp.67-82
- [4] Toshio Fukuda and Seiya Nakagawa: Approach to the dynamically reconfigurable robotic system, J. Intelligent Robotic systems, Vol.1 (1988) pp.55-72
- [5] 福田敏男, 薛国慶, 新井史人, 小菅一弘, 浅間一, 大森弘亨, 遠藤勲, 嘉悦早人:動的再構成可能ロボットシステムに関する研究(第14報, 視覚と力のアクティブセンシングを用いた自己組織化マニピュレータの組立作業誤差修正), 日本機械学会論文集(C), Vol.59, No.565 (1993) pp.2788-2795
- [6] H. Ueno, Y. Wakabayashi and S. Matsumoto: Reconfigurable On-orbit Experimental Testbed by Brachiating Manipulators, 6th Int'l Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2001) (2001)
- [7] 村田智, 黒河治久, 小銀治繁:自己修復する機械一分散ユニット構成による自己組み立て一, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.2 (1995) pp.254-262

- [8] Kohji Tomita et al.: A self-assembly and self-repair method for a distributed mechanical system, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.6 (1999) pp.1035-1045
 - [9] C.-J. Chiang and G. S. Chirikjian: Similarity metrics with applications in modular robot motion planning, *Autonomous Robots*, Vol.10 (2001) pp.91-106
 - [10] 吉田英一, 村田智, 小鍛治繁, 富田康治, 黒河治久: 自律分散機械による3次元形状の自己組み立てと自己修復, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.11 (1999) pp.1421-1430
 - [11] Mark Yim, Ying Zhang, John Lamping and Eric Mao: Distributed control for 3D metamorphosis, *Autonomous Robots*, Vol.10 (2001) pp.41-56
 - [12] Keith Kotay, Daniela Rus, Marsette Vona and Craig McGray: The Self-Reconfiguring Robotic Molecule, *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics & Automation (ICRA 98)* (1998) pp.424-431
 - [13] Akiya Kamimura et al.: Self-Reconfigurable Modular Robot—Experiments on Reconfiguration and Locomotion—, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001)* (2001)
- 10.3 多台机器人协调**
- [1] E. Nakano, S. Ozaki, T. Ishida I. Kato: Cooperative Control of the Anthropomorphic Manipulator “MELARM”, *Proc. of International Symposium on Industrial Robots* (1974) pp.251-260
 - [2] 黒野繁: 一对の人工の手の協調制御, 機械学会論文集, Vol.78 (1975) pp.804-810
 - [3] L. E. Parker: ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant, Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Robots, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (1994) pp.776-783
 - [4] B. Donald, L. Gariepy and D. Rus: Distributed Manipulation of Multiple Objects using Ropes, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2000) pp.450-457
 - [5] 山下淳, 太田順, 河野功, 福地正樹, 新井民夫, 浅間一: 複数移動ロボットによる協調物体操作計画, 電気学会誌 (C), Vol.121, No.3 (2001) pp.549-556
 - [6] Z. Wang, E. Nakano and T. Takahashi: Solving function distribution and behavior design problem for cooperative object handling by multiple mobile robots, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics (A)*, Vol.33, No.5 (2003) pp.537-549
 - [7] S. Yamada and J. Saito: Adaptive action selection without explicit communication for multi-robot box-pushing, *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics (C)*, Vol.31, No.3 (2001) pp.398-404
 - [8] Z. Wang and V. Kumar: Object Closure and Manipulation by Multiple Cooperating Mobile Robots, *Proc. of International Conference on Robotics and Automation* (2002) pp.394-399
 - [9] 小菅一弘, 大住智宏, 千葉晋彦: 単一物体を操る複数移動ロボットの分散協調制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1 (1998) pp.87-95
 - [10] D. Stilwell and J. Bay: Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-link Robots, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1993) pp.766-771
 - [11] O. Khatib: Mobile Manipulation: The robotic assistant, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 26 (1999) pp.175-183
 - [12] T. Sugar and V. Kumar: Multiple Cooperating Mobile Manipulators, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (1999) pp.1538-1543
 - [13] Y. Kume, Y. Hirata, Z. Wang and K. Kosuge: Decentralized Control of Multiple Mobile Manipulators Handling a Single Object in Coordination, *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2002) pp.2758-2763
 - [14] 木村浩, 梶浦吾一: 動作理解に基づく操縦ロボットと自律ロボットの協調作業, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.4 (1997) pp.624-633
 - [15] 池田ひなた, 相山康道, 原光博, 太田順, 新井民夫: 柔軟な連結部を持つ2台の脚ロボットによる自律的協調搬送, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5 (2000) pp.668-674
 - [16] 太田順, 武衛康彦, 新井民夫, 大隅久, 陶山毅一: 2台の移動ロボットの協調による搬送制御, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.2 (1996) pp.263-270
 - [17] 小菅一弘, 大住智宏, 千葉晋彦, 佐藤学: 2台の非ホロノミック移動ロボットによる分散協調搬送, 日本機械学会論文集 (C), Vol.65, No.634 (1999) pp.2379-2385
 - [18] T. Huntsberger et al.: CAMPOUT: A control architecture for tightly coupled coordination of multirobot systems for planetary surface exploration, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics (A)*, Vol.33, No.5 (2003) pp.550-559
 - [19] Y. Hirata and K. Kosuge: Distributed Robot Helpers Handling a Single Object in Cooperation with a Human, *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2000) pp. 458-463
 - [20] R. A. Brooks: A robust layered control system for a mobile robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No.1 (1986) pp.14-23
 - [21] R. C. Arkin: Cooperation without communication: Multiagent schema-based robot navigation, *Journal of Robotic System*, Vol.9, No.3 (1992) pp. 351-364
- 10.4 群体机器人系统**
- [1] ジェラルド・ベニ: 自律分散システムと群知能, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4 (1992) pp.457-463
 - [2] 菅原研: 集団運動の数理, 数理科学, No.431 (May 1999) pp.63-75
 - [3] 北村新三編: 「創発的機能形成のシステム理論」研究成果報告書, 文部省科学研究費補助金 [重点領域研究] (1999)

- [4] C. W. Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A distributed behavioral model (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings) Computer Graphics, Vol.21, No.4 (1987) pp.25-34
- [5] Mitchel Resnick 著, 山本順人, 西岡知之訳: 非集中システム, コロナ社 (2001)
- [6] M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colomi: The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, Vol.26, No.1 (1996) pp.29-41
- [7] P. Bak and K. Chen: Self-organized criticality, Sci. Am., Vol.264, No.1 (1991) pp.46-53
- [8] 伊藤正美: 自律分散システム研究の課題と将来, 計測と制御, Vol.32, No.10 (1993) pp.789-795
- [9] 湯浅秀男, 伊藤正美: グラフ上の反応拡散方程式と自律分散システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.11 (1999) pp.1447-1453
- 10.5 分布計画**
- [1] 太田順, 倉林大輔, 新井民夫: 知能ロボット入門, コロナ社 (2001)
- [2] J. E. Hopcroft, J. T. Schwartz and M. Sharir: On the complexity of motion planning for multiple independent objects; PSPACE-hardness of the "Warehouseman's Problem," Int. J. Robotics Res., Vol.3, No.4 (1984) pp.76-88
- [3] J. Barraquand and J.-C. Latombe: Robot motion planning: A distributed representation approach, Int. J. of Robotics Research, Vol.10, No.6 (1991) pp.628-649
- [4] L. E. Kavraki, P. Švestka, J.-C. Latombe and M. H. Overmars: Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.12, No.4 (1996) pp.566-580
- [5] P. A. O'Donnell and T. Lozano-Perez: Deadlock-free and Collision-free Coordination of Two Robot Manipulation, Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics and Automat. (1989) pp.484-489
- [6] M. Erdmann and T. Lozano-Pérez: On multiple moving objects, Algorithmica, Vol.2 (1987) pp.477-521
- [7] K. Azarm and G. Schmidt: A Decentralized approach for the conflict-free motion of multiple mobile robots, Advanced Robotics, Vol.11, No.4 (1997) 323-340
- [8] E. Freund and H. Hoyer: Real-time pathfinding in multirobot systems including obstacle avoidance, Int. J. Robotics Res., Vol.7, No.1 (1988) pp.42-70
- [9] T. Yoshioka and H. Noborio: Sensor-based traffic rules for multiple automata based on a geometric deadlock-free characteristic, J. Robotics and Mechatronics, Vol.8, No.1 (1996) pp.48-56
- [10] 加藤晋, 西山栄枝, 武野純一: 交通ルールの適用による複数の移動ロボットの協調行動, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2 (1994) pp.291-298
- [11] 新井民夫, 太田順: 仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7 (1993) pp.1039-1046
- [12] T. Balch and R. C. Arkin: Communication in reactive multiagent robotic systems, Autonomous Robots, Vol.1 (1994) pp.27-52
- [13] 市川純章, 原文雄: 群ロボットシステムにおける群知能の発現特性に関する研究—空間探索能力とその応用—, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.8 (1995) pp.1138-1144
- [14] 倉林大輔, 太田順, 新井民夫, 吉田英一: 掃引作業における移動ロボット群の動作計画, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2 (1998) pp.181-188
- [15] B. Yamauchi: Decentralized coordination for multirobot exploration, Robotics and Autonomous Systems, Vol.29 (1999) pp.111-118
- [16] W. Burgard, D. Fox, M. Moors, R. Simmons and S. Thrun: Collaborative Multi-Robot Exploration, Proc. Int. Conf. Robotics and Automat. (2000) pp.476-481
- [17] 石田亨, 片桐恭弘, 桑原和宏: 分散人工知能, コロナ社 (1996)
- [18] F. R. Noreils: Towards a robot architecture integrating cooperation between mobile robots: Application to indoor environment, Int. J. Robotics Research, Vol.12, No.1 (1993) pp.79-98
- [19] 浅間一, 尾崎功一, 松元明弘, 石田慶樹, 遠藤勲: 通信を用いた分散的管理に基づく複数の自律型ロボットの協調的作業分担決定手法, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7 (1992) pp.111-119
- [20] N. Miyata, J. Ota, T. Arai and H. Asama: Cooperative transport by multiple mobile robots in unknown static environments associated with real-time task-assignment, IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.18, No.5 (2002) pp.769-780
- 10.6 分布感知**
- [1] D. L. Hall and J. Llinas: An introduction to multisensor data fusion, Proc. IEEE, Vol.85, No.1 (1997) pp.6-23
- [2] E. H. Durfee and V. R. Lesser: Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.21, No.5 (1991) pp.1167-1183
- [3] V. R. Lesser and D. D. Corkill: The distributed vehicle monitoring testbed: A tool for investigating distributed problem solving networks, AI Magazine, Vol.4, No.3 (1983) pp.15-33
- [4] H. Ishiguro: Distributed Vision System: A Perceptual Information Infrastructure for Robot Navigation, Proc. Int. Joint. Conf. Artificial Intelligence (1997) pp.36-41
- [5] 松山隆司: 分散協調視覚プロジェクト, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4 (2001) pp.416-419
- [6] T. Wada and T. Matsuyama: Multiobject behavior recognition by event driven selective attention method, IEEE Trans., Vol.PAMI-22, No.8 (2000) pp.873-887
- [7] 十河卓司, 石黒浩: 分散全方位視覚の研究, 情報処理学会論文誌 (コンピュータビジョンとイメージメディア, 2001) Vol.42, No.SIG 13 (CVIM 3) (2001) pp.33-40

10.7 环境智能化技术

- [1] M. Weiser: The computer for the twenty-first century, Scientific American (1991) pp.94-104
- [2] 藤井輝夫ほか: 知的データキャリアによる群ロボットの機能創発, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No. 6 (1999) pp.848-854
- [3] 浅間一ほか: 知的データキャリアを用いたレスキュー支援システムの開発, 計測自動制御学会 SI 部門講演会講演論文集 (2000) pp.113-114
- [4] 日下部守昭ほか: 知的データキャリアを用いた実験動物管理システムの開発, 日本実験動物科学技術大会 2001 講演要旨集 (2001) p.190
- [5] Alex Pentland: Smart Rooms, Scientific American (April, 1996) pp.54-62
- [6] Mark C. Torrance: Advances in Human Computer Interaction: The Intelligent Room, Working Notes of CHI 95 Research Symposium, Denver, Colorado, May 6-7 (1995)
- [7] Barry Brumitt et al.: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, Proceedings of International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (2000)
- [8] Y. Nishida, T. Hori, T. Suehiro and S. Hirai: Sensorized Environment for Self-Communication Based on Observation of Daily Human Behavior, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2000) pp.1364-1372
- [9] I. A. Essa: Ubiquitous Sensing for Smart and Aware Environments: Technologies towards the Building of an Aware Home, Position Paper for the DARPA/NSF/NIST Workshop on Smart Environment (July 1999)
- [10] Michael C. Mozer: The Neural network House: An Environment that Adapts to its Inhabitants, Proceedings of International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (September) (1998)
- [11] J.-Ho Lee, N. Ando and H. Hashimoto: Design Policy for Intelligent Space, IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conference (1999)
- [12] T. Sato, Y. Nishida and H. Mizoguchi: Robotic Room: Symbiosis with Human through Behavior Media, Robotics and Autonomous Systems 18 International Workshop on Biorobotics: Human-Robot Symbiosis, Elsevier (1996) pp.185-194
- [13] Y. Nishida, M. Takeda, T. Mori, H. Mizoguchi and T. Sato: Monitoring Patient Respiration and Posture using Human Symbiosis System, Int. Conf. On Intelligent Robot (IROS) (1997) pp.632-639
- [14] T. Mori, H. Noguchi and T. Sato: Construction of sensor network system for human behavior measurement and accumulation via distributed objects, Proceedings of SPIE, Vol.571 (Oct.2001) pp.230-237
- [15] T. Mori et al.: One-Room-Type Sensing System for Recognition and Accumulation of Human Behavior, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2000) pp.345-350
- [16] T. Mori, K. Asaki, H. Noguchi and T. Sato: Accumulation and Summarization of Human Daily Action Data in One-Room-Type Sensing System IEEE/RSJ, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001), (Oct.2001) pp.2349-2354
- [17] H. Morishita, K. Watanabe, T. Kuroiwa, T. Mori and T. Sato: Development of Robotic Kitchen Counter: A Kitchen Counter Equipped with Sensors and Actuator for Action-adapted and Personally Fit Assistance, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), (Oct. 2003) pp. 1839-1844
- [18] R. Fukui, H. Morishita and T. Sato: Expression Method of Human Locomotion Records for Path Planning and Control of Human-symbiotic Robot System based on Spatial Existence Probability Model of Humans, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001), (Sep. 2003) pp.4178-4184
- [19] 橋本秀紀, 渡辺朋子: 空間知能化のデザインー建築・ロボティクス・IT の融合, NTT 出版 (2004); Intelligent Space, <http://dfs.iis.u-tokyo.ac.jp>
- [20] J.-H. Lee and H. Hashimoto: Intelligent space-concept and contents, Advanced Robotics, Vol.16, No.3 (2002) pp.265-280
- [21] 橋本秀紀: 空間知能化に関する研究動向, 電気学会論文誌 (D), Vol.121, No.9 (2001) pp.917-922
- [22] 橋本秀紀: インテリジェント・スペース, SICE'97 第 36 回学術講演会予稿集, 103 C-8 (1997) pp.45-46
- [23] G. Appenzeller, J.-H. Lee and H. Hashimoto: Building Topological Maps by Looking at People: an Example of Cooperation between Intelligent Spaces and Robots, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, France (1997) pp.1333-1426
- [24] 橋本秀紀, 小林尚登, 山口亨: インテリジェント・インタラクティブ・スペース, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1998 年講演論文集, 2 B14
- [25] Kynan Eng et al.: Ada-Intelligent Space: An Artificial Creature for the Swiss Expo.02, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei (2003) pp.4154-4159
- [26] MIT Changing places/House-n: MIT home of the Future Consortium, http://architecture.mit.edu/house_n

10.8 創发机器人学

- [1] 多田富雄: 免疫の意味論, 青土社 (1993)
- [2] 中村桂子: 自己創出する生命, 哲学書房 (1993)
- [3] H. R. Maturana et al.: Autopoiesis and Cognition, D. Reidel Pub. (1980)
- [4] 河本英夫: オートポイエーシス, 青土社 (1993)
- [5] W. M. Mitchell: Complexity, Sterling Lord Literary inc. (1992)
- [6] 金子邦彦, 津田一郎: 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店 (1996)

- [7] K. Kelly: Out of Control, Brockman Inc. (1994)
(訳: 複雑系を超えて, アスキー出版局 (1999))
- [8] E. Jantsch: The Self-Organizing Universe—Scientific and Human Implication of the Emerging Paradigm of Evolution, Pergamon Press (1980)
- [9] 伊藤正美: システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627
- [10] 伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430
- [11] 伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)
- [12] 吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)
- [13] 佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)
- [14] 三宅美博: 生命における設計, 現代思想, Vol.25, No.7 (1997) pp.301-317
- [15] 浅田稔: 主体と環境: 身体性に関する一考察, 第2回創発システムシンポジウム (1996) pp.48-53
- [16] 中村雄二郎: 臨床の知とは何か, 岩波新書 (1992)
- [17] 中村雄二郎: 共通感覚論, 岩波現代選書 (1979)
- [18] 中村雄二郎: 術語集II, 岩波新書 (1997)
- [19] 河合隼雄: 関係性の科学の可能性, 日本ファジ学会誌, Vol.9, No.5 (1997) pp.598-602
- [20] 伊藤宏司: 自律ロボット・進化ロボット, Vol.77, No.2 (1994) pp.155-160
- [21] 伊藤宏司: 内部モデルに基づく運動の学習と制御, 脳の科学, Vol.23 (2001) pp.569-577

システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627

伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430

伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)

吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)

佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)

参考文献

システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627

伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430

伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)

吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)

佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)

参考文献

システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627

伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430

伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)

吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)

佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)

システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627

伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430

伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)

吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)

佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)

参考文献

システム制御の新しい展開—自律分散制御, 機械の研究, Vol.44 (1992) pp.619-627

伊藤宏司: 創発システムと生物型人工物, 精密工学会誌, Vol.64, No.10 (1998) pp.1428-1430

伊藤宏司編: 知の創発, NTT 出版 (2000)

吉永良正: 複雑系とは何か, 講談社現代新書 (1996)

佐々木正人: アフォーダンス—新しい認知の理論, 岩波書店 (1994)

第 11 章 机器人的可靠性、安全性、可维护性以及与人共存性

近几年来,人们对有关人类和机器人共存的研究兴趣越来越浓,究其原因,在于它可能是阐明认识科学的工具,或者说它在虚拟现实、人机接口,甚至助力器械方面具有潜在的应用前景。研究和开发与人类共存的系统不仅有利于更加充分地理解机器人一侧,而且对充分理解人类一侧的可靠性、机械特性也有着重要的意义。从这个观点出发,本章首先以机器人系统为对象,从系统单元的可靠性、可维护性进行展开,叙述机器人整机的可靠性设计。其次,讨论在人与机器人共存的系统中如何分辨人为误动作,以及机器人如何确保人身安全等问题,并从力学观点出发,分析和概述了人和机器人如何才能达到协调作业的水平。进而解释何谓人和机器人之间的亲和性。最后,提出机器人推断人的意图这一概念,指出这是人和机器人协调性、亲和性的关键所在。本章介绍了有关内容的研究现状、技术进展和展望

有关工业机器人安全性的内容在第 7 篇的第 4 章中将有详细讲述,其中还涉及机器人的立法问题,请读者自行参考。

山田阳滋

11.1 系统可靠性的定义与度量

11.1.1 可靠性和可维护性的定义与度量

可靠性(reliability,以下简称“R”)、可维护性(maintainability,以下简称“M”)的相关术语被收录在国际电气标准会议技术名词 IEC50(191),以及日本工业标准 JIS Z 8115:2000《可靠性(dependability)名词》中。可信性(dependability,以下简称 D)是一个综合名词,涉及系统的可用性(availability,开工率、运转率,以下简称 A)以及与此相关的要素,包括可靠性、可维护性、维护支持(mainte-

nance support,以下简称 MS)等^[1,2]。

R、M的对象被分为非修理系统和修理系统。对于前者,人们所关心的无故障能力 R 是指从投入运行到发生故障为止的时间(time to failure)。对于后者,无故障能力 R 与表征修复故障快慢能力的 M 有关,由于无故障运行状态和故障修复状态在时间上是交替出现的,因此人们对于 R 的关心改为相邻两次故障的时间间隔,即所谓的故障间运行时间(operating time between failures)。对于 M 来说,人们最关心的是修复时间(time to restoration 或 recovery, repair)。所谓故障(failure),是指丧失了满足功能的能力,严格地讲是指发生了失效的情况(event),而故障状态(state)一般称为错误(fault)。

1. 可靠性

R 是对象在给定条件下、给定期间内完成给定功能的能力。进行定量描述的话,可以将从开始时刻($t=0$)到规定时刻 t 为止(一般为 t_1 开始到 t_2 结束)的故障概率定义为 $F(t)$,称之为不可靠度(unreliability),而可靠度即为 $R(t)=1-F(t)$ 。人们将上述直至发生故障为止的平均时间定义为 MTTF(M 是 mean 的缩写)。修理系统的平均故障间运行时间用缩写 MTBF(严格地说,这里的 T 代表 operating time)表示。

2. 可维护性

M 是指在给定使用条件下,按照给定顺序和资源对修理系统进行维护时,对象保持给定功能运行状态或可修复的能力。如果进行定量描述的话,人们把开始作业到给定时间 t 为止维护所完成的概率定义为 $M(t)$,称之为可维护度,把直至修复完成的时间,即上述修复时间的平均值缩写为 MTTR。

维护(maintenance)分为预防维护(保持对象可运行状态)和事后维护(排除故障)。

与 M 密切相关的是 MS , 它表示在给定维护方针和维护条件下负责维护的组织所具有的根据要求提供维护所必要的资源的能力。

3. 可用性

A 是指在所要求的外部资源得到满足时, 在给定条件、给定时刻或时期内修理系统能按照要求执行功能的能力。 A 与上述的 R 、 M 、 MS 有一定的联系, 如果用定量来描述, 人们往往以某期间里 R 、 M 的观测数据为基础, 用时间来表达可用性, 它的计算公式是 $A = MTBF / (MTBF + MTTR)$ 。

4. 故障率和故障强度

除了上述 $R(t)$ 、 $MTTF$ 、 $MTBF$ 以外, 还可以用故障率 (failure rate, 记为 $\lambda(t)$) 作为评估 R 的尺度。它的定义与故障密度函数 $f(t) = -dR(t)/dt$ 有关, 公式为 $\lambda(t) = f(t)/R(t) = [-dR(t)/R(t)]/dt$ 。从上式的积分可以得到如下表达式: $R(t) = e^{-H(t)}$, $H(t) = \int_0^t \lambda(x) dx$ (危险积累函数)。实际上, 若设 λ 不变 (随机故障), 则一定期间内的平均故障率 = (该期间内的故障总数) / (该期间内的总运行时间)。如果 n 个设备经过 t 小时运行几乎不发生故障, 那么分母大致等于 nt , 称此为单位时间 (unit hour 或 component hour)。处理修理系统时, 通常用 $z(t)$ 取代非修理系统的 $\lambda(t)$, 称之为故障强度 (failure intensity)。

至于故障率和不良率, 虽然两者都有“率”这个字眼, 但前者表示微小时间 dt 内 R 减少的速率 ($-dR(t)/R(t)$), 其量纲为 (1/时间), 后者则仅仅表示一个无量纲的比例。故障率的单位有 $1 \times 10^{-3}/h$ 、FIT (Failure In Time) = $1 \times 10^{-9}/h$ 等。

故障率的模型可以举出人们熟知的“浴盆”形曲线 (bath-tub curve), 它表示故障率随时间变化的倾向与人类死亡率模式相近。曲线由三个部分组成: 先是初期故障期 DFR (Decreasing Failure Rate); 然后进入随机故障期 CFR (Constant FR, 这里的 $R(T) = e^{-\lambda T}$, $H(t) = \lambda t$, $\lambda = 1/MTTF$ (或 $MTBF$)), 此时的 λ 最小; 最后进入系统老化导致的故障集中发生期 IFR (Increasing FR)。定时更换元器件等在时间上采取的预防维护措施只对 IFR 阶段有效。如果能够改善对象, 使 $\lambda(t)$

(或 $z(t)$) 减少, 那么 DFR 阶段就不复存在, 改称作 R 成长 (R growth) 阶段, 即管理指标得到改善。对此有人提出了在开发期间 T 的 $T^{-\alpha}$ (α 为成长率, $0 < \alpha < 1$) 时段 $z(t)$ 减少的 Duane 模型或 NHPP (非稳定泊松过程) 模型。

11.1.2 数据与故障分析

1. $R \cdot M$ 的数据与分析^[3~5]

这里所说的数据, 不仅指对象的定量数据, 如 R 、 M 时间 (距离、次数) 等, 还包括定性的、本质的数据, 如故障模式等。此外, 对于分析来说, 对象的设计、制造、试验、使用、维护、服务等履历、周边信息也有参考价值。数据和分析的结果应该归档到数据库中进行集中管理和使用。

数据分析包括按照要求的类别定量评估 R 、 M 的度量尺度、特征值的数量分析或统计分析, 以及与判定故障原因, 改善 R 、 M 有关的技术分析和故障分析等。

2. 统计分析

为了掌握单元的寿命、强度、疲劳等的分布特性, 可以适用数据的正态分布、对数正态分布、指数分布、韦伯分布 ($R(t) = \exp[-(t/\eta)^m]$, m 为形状参数, η 为尺度参数, $m=1$ 时为指数分布)、极值分布等。此时, 若某时刻 n 个设备中的第 r 个发生故障, 可以改用平均排位法公式推算 R : $\hat{R}(t) = (n-r+1)/(n+1)$ 。如果有多个故障原因 (模式), 则改用危险累积法推算 R , 即向每个模式代入 $\hat{H}(t)$, 改成 $\hat{R}(t) = e^{-\hat{H}(t)}$ 。

一般来说, 时间数据里不仅包括故障时间, 还包括在监测过程中被故障中止前的无故障数据。如果计算平均故障率, 也要把这些信息计入总运行时间中。如果到达某个时限 t , 被检测的 n 个设备并无故障发生, 那么可引用置信度 $(1-\alpha)\%$ (α 为危险率, 如 $\alpha = 0.1$) 的概念, 按照 $R_L = \alpha^{1/n}$ 推算 R 的保证值的下限 R_L 。

3. 故障分析

故障分析容易被误解为是对故障 (毛病)、物证现场的事后分析, 其实保证 R 、 M 和安全性最好的办法不如在系统运行的各个阶段就注重故障的分析和排除。

对系统故障和事故的分析, 首先应该从

把握现场的全局和周边状况开始,综合以往的案例和相关的技术,充分认识问题,对故障的发生过程建立假说,进行取证。这时需要采用本章 11.1.3 节 3) 中介绍的 ETA、FTA、HA 等系统分析法、仿真手段、重现实验等。如果故障分析的对象是设备、部件、材料,那么可以从对象全体的非破坏观测开始,逐渐进入到各个部分破坏状况的详细分析。分析涉及材料性质、破坏力学、物理、化学,以及各种现成的故障物理(physics of failure, reliability physics)方法,必要时可借助于专门分析设备。

11.1.3 可靠性设计与试验

1. D 程序

向系统具体贯彻 R 、 M 要求时,不仅涉及设计,还涉及综合组织管理,即 D 程序,也就是在生命周期的各个阶段(phase),包括构思、定义、设计、制造、安装、运行、维护、报废的整个过程,都有效地运用相关技术。此时应该从系统整体的角度出发,在 R 、 M 、 MS 、安全性,以及其他要求之间寻找折中的途径。

D 程序既包含各个阶段应该开展的验证(verification)工作,在最终履行的用户要求认证(validation)工作,也包括针对技术分析、仿真、设计审查(design review)开展的各种评估和试验(test)(它们被简称为 $V \cdot V\&T$)^[2]。

2. $R \cdot M$ 设计和维护^[4,5]

一般来说,为了避免高致命度的故障成因,从一开始就应该建立一个固有 R 值很高的系统(所谓的 fault avoidance)。为此,通常的做法是采用可靠的单元或简单地引用标准方案,去除致命的单一故障源,减小容易引起劣化和故障的应力(以及温度、振动、噪声、灰尘等)成分,减轻软件的负担,制定较为保守的操作规程等。

即便在部分系统出现错误的情况下也不至于酿成系统的致命崩溃,进而可以展开容错性设计。为此有很多种方法及对策,如冗余(redundancy)结构、功能分散化·多重化、与可维护性有关的异常(错误)检验·诊断(自动诊断、远程诊断)、修复、系统重构、重试,直至采取人为错误和安全事故防范(fool-proof)、故障弱化(fail-softly)、故障防护(fail-

safe)等措施。有时让人机接口带有画像、语音等信息传达功能也能起到避免错误或减少错误的作用。

上面介绍的在 $R \cdot M$ 设计阶段去除、减轻、检查、警告、阻止、回避、杜绝事故(错误)的方案,对安全性来说同样是相通的。例如,提高本质安全实际上也是一种把风险抑制到容许限度以下的安全设计方案。

只有一部分机械设备的维护适合采用 IFR 型单元。这些 IFR 型单元对按时维护方式(包括定时更换元器件)是有效的。为此应该更加重视以状态监视维护为中心,考虑安全性、诊断和维护便利性、低成本的、以维护为中心的可靠性(RCM: Reliability Centered Maintenance)维护理念。

3. 系统 R 的模型

应该结合系统的 R_s 和构成单元 R_i 的模型开展系统 R 的预测和分配。典型的做法是用 R 方块图(RBD: Reliability Block Diagram)描述 R 功能的串联模型和并联模型。

1) 串联模型

系统描述为通过 n 个独立单元在功能上串联的结构, R_s 可以从它们全部的工作关系

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (\text{“与”逻辑}) \text{ 来求解, 而 } F_s(t) = 1 - R_s(t) \text{ 可以从 } F_i(t) \text{ 的“或”逻辑来求解 (特别是在 } F_i \text{ 很小的场合, 有 } F_s(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t)). \text{ 另外, 关系式 } H_s(t) = \sum_{i=1}^n H_i(t),$$

以及 $\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$ 也成立。它们都是与 R 分配和预测有关的基本公式。关于 A_s , 同样有 $A_s(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t)$, 在随机故障($\lambda = 1/\text{MTBF}$)和随机修复(修复率 $\mu = 1/\text{MTTR}$)条件下, 使用维护系数 $\rho = \lambda/\mu = \text{MTTR}/\text{MTBF}$ (一般 $\mu \gg \lambda, \rho \ll 1$), 得到关系式 $\bar{A} = 1 - A \approx \rho, \rho_s = \sum_{i=1}^n \rho_i$, 该关系式可以用于 A 的分配和预测。

2) 并联模型和其他冗余系统

借助系统功能的冗余性提高 R 的典型方法是构建并联模型。系统中有 n 个独立的单元, 只要至少有一个能运行就能保证系统完成任务, 故与串联模型相比它是有备份的。即从 $R_i(t)$ 的“或”逻辑可以求解 $R_s(t)$, 而从 $F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$ (与逻辑)可以求得 $F_s(t)$ 。

让并联单元中的一个单元处于长时间运行的状态,其他单元处于待机状态,一旦主运行单元发生故障即启用其他单元替换,这样的冗余备份(stand-by redundancy)系统能够得到比并联系统更高的 R_i 。如果把串联、并联系统一般化为 m out of n :G(good) 系统($m=n$:串联类, $m=1$:并联类),并且由相同 λ (定值)的 n 个单元构成系统,那么当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\lambda_i(t)$ 将趋近于 $m\lambda$,而且在开始时取值可以极小($t=0$ 时, $\lambda_i=0$,随后以 t^{n-m} 增加)。这就是冗余系统的优点。另外,动态冗余方式(立即修复故障单元),又比静态冗余方式(非立即修复故障单元)具有更高的 R_i 。

3) 系统 R 分析法

人们提出很多开展系统 R 分析的方法,例如,定量的、定性的、演绎的 top-down、归纳的 bottom-up 等。具体说有 FTA(Fault Tree Analysis)法,其特点是用树形图把主故障向原因一侧进行逻辑展开。又如 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis,在 hazard mode 的场合称为 HA, Hazard Analysis),它反过来把原因一侧的故障(错误)模式的影响归纳成表格进行相对评价。再有 ETA(Event Tree Analysis),将故障源最终引发的故障和事故以事件沿时间推移的顺序绘制成树形图展开,还有 HAZOP 法(hazard operability analysis),以导引词(guide word)为线索查找物质流、信息和时序流的异常等。上述方法不仅能开展对系统 R (包括人类的错误)的分析,还能开展安全性分析。

4. 可靠性试验

根据不同的目的有不同的可靠性试验方法。例如,有复合环境的实际运行的仿真,有加速的或活性的实物试验或环境试验,有人机接口的仿真试验,有去除隐性错误的筛选试验等。

盐见 弘

11.2 机器人的可靠性

11.2.1 故障分析和故障对策

工业机器人故障不仅影响整个系统的运行,还因为有时人站立于机器人近处进行示教,故障可能引发重大人身安全事故。今后康复机器人、娱乐机器人,甚至医疗机器人等与

人共存的机会逐渐增多,可见减少故障,以及一旦故障发生的应急对策将变得越来越重要。

机器人属于可编程设备,它的使用条件或环境随用户的不同呈现相当大的差异。再者,它又是一个机械、电气、软件等集成系统,其故障的表现模式很多。不过换一个角度来看,正因为它是集成系统,所以也允许配备更多传感器检查故障,探究故障的原因,以便采取必要的处置。

提高机器人的可靠性有一点十分重要,就是故障一旦发生,在分析原因采取对策的同时,不仅对该故障,而且对周边潜在的故障萌芽(所谓的举一反三)也采取了防范。

故障分为三类:①故障中有元器件损坏,显然,这有利于人们推测故障的原因,例如,设备布线的断线等;②虽然有元器件的损坏,但很难找出原因,例如,电子元器件的故障;③偶发故障,有时事后又自行恢复不再出现。例如,特定条件下引起的软件问题。

其中,确定难以推断原因的故障和偶发故障的起因并采取相应的对策,对提高机器人的可靠性尤为重要。为此,我们不仅应该记录故障发生的档案,而且应该将设备正常运行时的各种状态(电机电流值等)记录备案,这有一点类似于飞行记录仪那样的功能。实际上最新的机器人上有些已经配备了这些功能。

这个功能不仅对机器人自身的故障排除,也对尚未组合的元器件的质量进行评估,乃至对机器人作业失败等的分析也颇有帮助,对提高设备的整体可靠性很重要。

此外,故障还可能是由于用户使用问题,或者说误操作引发的。有些事先可以估计到的人为故障,例如,过电流、过负载错误等造成的停车,都应该准备防患于未然的措施。

另外,考虑好故障对策,事先设计在带故障状态下安全运行的措施,对一旦发生故障后仍能保证安全运行,也是很重要的。一般使用 FTA,它的功能是在某个元器件或某个软件模块出了问题时验证系统是否处于危险状态。如果发现故障模式,它或者变更系统的组成结构,以保证在故障状态下仍然能安全运行,或者设置系统故障检查功能进行自行处置。从确保安全的观点来看,重要部分也可以采用双工备份设计。

11.2.2 可靠性设计和评价

为了提高机器人的可靠性,在产品规划和创意阶段就应该贯彻质量优先的思想,在工程设计阶段和制造阶段应该确保制造质量,产品进入市场后的阶段,将市场的可靠性评价和故障分析信息反馈回来等都是非常重要的^[1]。表 11.1 给出在生产活动的各个阶段应该开展的可靠性保障活动。

表 11.1 各个阶段的可靠性保障活动

产品规划 创意阶段	开发设计阶段	制造阶段	销售·服务阶段
市场调查 各种规格和 法规的调查 目标值设定 可靠度预测 可靠性评估	元器件材料 评价和选择 可靠性设计 寿命设计 失败案例 FMEA、 FTA 疲劳试验	初期流动 管理 工程设计 作业指导 工序管理 和监查 接货检查, 出货检查 向外部订 购指导	质量监测 赔偿分析 故障分析 市场处理 改良设计

虽然在机械设计阶段是按照规定的寿命期限进行驱动系统设计的,但是仍然需要通过疲劳试验验证是否会出现意外磨损,或者内部布线的耐久性问题等。在必要的场合,还应该确定注油事件的间隔、易损件(传送带等)的定期更换期限、检查期限等。

现在,机器人手臂等的结构设计完全可以借助于三维 CAD 设计进行,在 CAD 数据的基础上展开结构分析,强度评价的工具也很得力。所以,手臂设计在现阶段已经能够保证做到质量轻、可靠性高。

对于控制器来说,有关元器件最高电压和最大电流的计算、最高温升的限制、电解电容器等消耗品的寿命计算都是必要的。在综合性能方面,则需要借助于耐噪声试验、传输振动试验、冷热循环试验等对元器件或焊点部分做耐久性评价。

至于软件,随着用户接口的增加、性能的提高、网络等新功能的扩展,软件包的规模也越来越大,这给可靠性带来极大的挑战。提高软件的整体可靠性,可以引入软件结构化设计的思想、瀑布(water fall)模型、V 字模型等,以提高各个软件模块的成熟度^[2]。

遵守一定的设计程序对确保软件可靠性是十分重要的。首先在软件整体结构设计上应该以性能规格说明书的形式归纳各个模块所应具有的功能。编程后,应该依据性能规格说明书认真进行单个模块测试,然后完成整体测试。

实际上,靠传统方法预测软件故障和错误是一件困难的事情。此外,再加上瞬间噪声、放射线所造成的非预期程序动作、死机的可能因素更加剧了预测的难度,所以一般改用监视时钟或硬件技术来监控软件的运行。

反过来,在很多场合又可以用软件代替硬件进行故障检查和异常处理,像这样发挥软硬件双方特点是保证可靠性的重要措施。

制造工序也是保证可靠性的一个重要环节。要弄清楚某工序偶发的制造错误能否在下道工序或检验工序里发现,如果答案是否定的,那么就必须在本地工序采取措施,切实把次品消灭在下一道工序之前。

以减速器螺栓紧固作业为例,经常发生多组螺栓连接中某组螺栓被忘记旋紧的情况。为了防止疏漏紧固错误的发生,可以追加一个作业,就是预先分发恰好数量的螺栓,作业之后经过清点如果证实螺栓悉数用尽,那就说明该工序无漏紧现象。当然也可以在作业中加入其他监视手段,如旋紧时对每一个螺栓都做记号等。

11.2.3 工业机器人的安全性

随着社会的发展,人们对制造者安全方面的责任要求在不断提升,企业的社会责任已经从传统的增加生产数量、改进生产效率指标转移到对环境、对安全等方面的要求。

客观评价和确认安全性的典型的标准是 ISO 和 IEC 等标准。在机器人的安全性方面,同样应该遵照这些国际通用的标准^[3]。

在决定机器人应该遵循的安全等级标准时,建议依据国际安全标准的 B 标准,即 ISO 13849-1(机械类的安全性)中所规定的安全规范的选择。

这里的安全规范是指与安全性能评价有关的意思,这些安全等级是针对在不同风险下保证合理的安全性而设置的。表 11.2 规定了维持各规范安全性能的具体要求。

例如,将异常停止回路改成双回路,由于

能避免单一故障(通常认为在安全一侧不易发生故障,不过如果考虑到配线短路,也存在引发故障的可能性)中安全功能的丧失,因此满足规范 3。但是如果在一个继电器里连接双回路,一侧触点被熔化会对另一侧电路产生影响,故应该选用强制引导式继电器。

表 11.2 安全规范的分类和要点(ISO 13849-1:1999)

规范	要求事项的要点	系统状况	安全原则
B	为使有关的结构部分、控制系统及(或)保护设备能承受预想的影响,必须遵从相关规范进行设计、制造、选择、装配、组合	发生事故时安全功能或许失效	安全性主要由结构部分决定
1	满足 B 的各项要求 必须采用经过充分讨论的结构设计和安全规则	发生事故时安全功能或许失效,但发生概率比 B 低	
2	必须满足 B 的各项要求和经过充分讨论的安全原则 定期利用机械控制系统对安全性能进行检查	——检查期间发生的事故可能导致安全功能失效 ——由检查发现安全功能失效	特点主要由结构决定
3	必须满足 B 的各项要求和经过充分讨论的安全原则 与安全有关的部分应按如下设计: ——任何部分的单一事故不至于导致安全性能失效 ——在合理操作条件下能找出单一问题	——虽然发生单一事故,但安全功能始终可以发挥效用 ——能检查出部分事故(虽然非全部事故) ——潜藏无法查出的事故,故有时会引发安全功能失效	
4	必须满足 B 的各项要求和经过充分讨论的安全原则 与安全有关的部分应按如下设计: ——任何部分的单一事故不至于导致安全性能失效 ——单一事故能在安全性能检查时或之前检查出来。 若不满足此项,则潜在事故也不应该致安全性能失效	——发生事故时安全功能始终能发挥效用 ——防止事故被找到后,安全功能反而失效	

进一步,我们可以设法检测异常停止双回路之间的一致性或不一致性,将系统设计成如果发现不一致就禁止运行,结果同样能检测出单一故障,因此说满足规范 4。

下面举例说明决定安全规范的具体步骤。

例如,用安全栅栏将机器人隔离,让它在隔离的环境中进行运行。

危险源:机器人处于高速、大功率运行状态

风险:与高速动作的机器人接触具有危险性

危害程度:功率大故危害严重(S2)

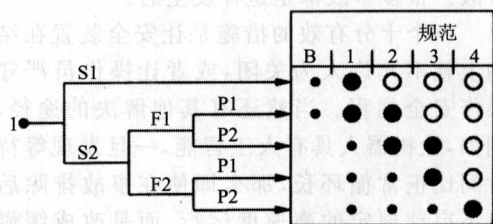
发生频率:有安全栅栏隔离故极低(F1)

避免的可能性:速度高,无法避免(P1)

如果按照图 11.1 来评价应该遵照安全规范 2 或 3 的要求进行设计。

下面再举同样的机器人在安全栅栏里进行示教作业时决定安全规范的具体步骤。

危险源:机器人处于低速、大功率运行状态



1 控制系统中与安全有关部分的风险估计起点

S 伤害等级

S1 轻伤(可痊愈)

S2 包括死亡的重伤(通常无法痊愈)

F 危险源的频率及/或时间

F1 从“极少”到“时常”,及/或短时间

F2 从“频繁”到“持续”,及/或长时间

P 规避危险源的可能性

P1 特定状况可能

P2 几乎不可能

选择规范 B, 1, 2, 3, 4

与控制系统安全有关的规范 B, 1, 2, 3, 4

● 基准点推荐的规范

● 要求追加措施的可行规范

○ 超过相关风险程度的措施

图 11.1 安全规范选择步骤(ISO 13849-1:1999)

风险:与安全栅栏内的机器人有接触的
危险性

危害程度:功率大故危害严重(S2)

发生频率:因靠近机器人作业故频繁(F1)

避免的可能性:速度低避免(P1)

如果对此进行评价,应该遵照安全规范 3
的要求进行设计。

于是可知,在上述场合机器人必要遵照
的安全规范是 3。

在 ISO 10218(JIS B 8433)“工业机器人
的操作——安全性”,即规格 C 中也规定了机
器人应该满足的保证安全性的指南。

应该指出,满足上述规定并非就能够确
保机器人的安全。对实际事故的调查发现,
大部分事故案例都发生在机器人处于正常运
行状态的时段。

例如,因某种原因待装配零件在供料站
歪斜了。机器人有时会误判为没有零件,于
是它就按照程序指示处于等待状态,待动作
条件满足后再执行。

此时如果操作员发现事故,需要关闭安
全装置伸手进入禁止区扶正部件排除事故,
此时若麻痹大意往往会出现手臂尚未缩回,
机器人即恢复正常运行情况,就容易造成
事故。很多事故都是这样发生的。

一个十分有效的措施是让安全装置在结
构上就不允许人为关闭,或者让操作员严守
操作安全规程。当然还有其他解决的途径,
例如,让机器人具有人工智能,一旦发现等
待时间比正常循环长,那么即使在事故排除
后也不启动规定的高速度运行,而是改成
缓慢执行,或者在征得继续动作的许可后
方可开始执行。

总之,安全性的考虑必须通过对机器人,
乃至机器人系统的既发事故案例的分析和
调查,十分周到地顾及各种可能发生的情
况。

小南哲也

11.3 人为错误

其实,对机器人这样有一定自主性的高
级机械系统,把机械的高级功能和操作这
些功能的人的认知功能构成“联合认知系
统”(joint cognitive system)进行分析、评
价、设计是很必要的,人们称之为“认知
系统工程(cognitive system engineering)”,
下面就从认知系统的观点出发介绍人为错
误的基础知识,即人类行动模式及其特点、
人为错误的构成、人为错误的对策等。

11.3.1 人类行动模式 and 特点

在一个机械与操作它的人类所组成的人
机系统中,人类要素的不同视角会导致对
人为错误的不同看法。这些视角大致有
机械主义(mechanistic)、认知心理学
(cognitive)、技术社会论(socio-technical)
等。表 11.3 给出上述视角对人-机系统
中人类要素和人为错误的看法和分类,比
较了在人机接口进行设计时的区别。

人们对操作机械时人类的行动模式持
有两种观点:一种是关心在任务熟悉过程
中处理内部认知信息的区别;另一种是关
心人类身边的环境和人文脉络的区别。下
面分别加以说明。

1. 操作员的三种行动模式

操作员熟练程度的差异导致在接口中
人类处理信息的行动模式的区别,衍生出
人为

表 11.3 人-机系统中人要素和人为错误的分类

	机械主义 (mechanistic)	认知心理学 (cognitive)	技术社会论 (socio-technical)
要 点	把人的因素视为硬件 处理	重视人类高级功能的内部机制	重视人的集体行动的存在 形式
人为错 误认识	以人的外部行动为基准 划分失败或成功	注视行动意图形成的阶段	重视行动动机
人为错 误的分类	省略(非必须的) 承诺(必须的)	疏忽(意图正确但实行失败)错误 (在行动意图形成阶段的错误)	过失(信息处理不当)违反(动 机欠佳)
接口设 计应用	将感觉和知觉心理特点 用于布局设计	将认知心理特征用于智能支持	用于协作设计,如改善信息共 享形态等

错误的不同特点。J. Rasmussen 认为“熟练程度的差异,产生三种接口提示信息的显示方法:signal,sign,symbol,于是认知行动相应于知觉模式也产生不同的行动模式”。据此他提出三种基本操作行动模式:无意识的反射行动即技能基本行动、有意识的模式化的规则基本行动、有意识的抽象逻辑思考的知识基本行动^[1]。图 11.2 给出 J. Rasmussen 提出的操作员的三种行动模型。

Reason 和 Embrey 以上述行动模型为基础,提出了按照时间效果定性的操作员行动模型(GEMS 动态模型),此时操作员可能出现的人为错误的形态又有三种行动模式:①在监视中的技能基础过错(slip);②应对异常的规则基础过错;③知识基础过错(mistake),用表 11.4 给出^[2]。

2. 行动的控制模式

Hollnagel 认为执行任务的时间裕度对操作员行动的影响最大。至于其他影响因素,

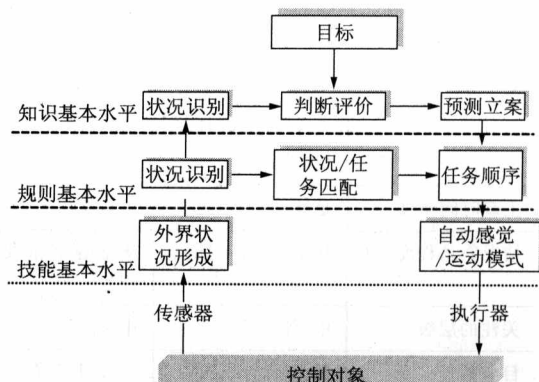


图 11.2 操作员的三种行动模式

如果考察人工任务的要求和负载量、物理环境、组织和社会环境等逻辑关系对行动的控制模式的影响,可以划分为战略控制模式、战术控制模式、机会主义模式、混乱状态模式等^[3]。将以上控制模式的含义及特性列于表 11.5 中。

表 11.4 三种行动模式的特性

	技能基础行动	规则基础行动	知识基础行动
行动类型	日常工作行动	解决问题行动	
	熟悉情况 作业轻松熟练		未熟悉的新情况 滞后、断续
输入信息	使用连续 signal	使用行动计划不变且灵活的 sign	使用 symbol 驱动智力模型
关注重点	当前任务以外的其他问题	面向相心的问题	
控制模式	以并行自动处理为主 (规划) (内部规则)		受资源制约,有意识地选用串行处理
错误类型预测性	可以大体预测的、习惯性错误倾向(strong-but-wrong)		具有不确定性的初学者错误
对疲劳的敏感度	低	中	高
错误发生的潜在机会与实际发生次数之比	发生错误次数多,但是占错误潜在机会的比例小		绝对数小,但比例大
状况原因的影响	低等或中等程度 受内在因素(以往的使用频率)影响为主		外界原因为主
与引起误差的外因的关联度	无法根据外界变化采取适当的应对措施	欠缺对外界变化的时间和形式的了解	对外界变化缺乏知识和准备
检查的便利性	一般可以迅速检查		困难,多数借助于外部检查

表 11.5 行动的控制模式及其特性

控制模式	战略控制	战术控制		机会主义	
含 义	把握全局,着眼于未来长期目标的行为选择	遵从某种计划、顺序、规则,采取稳健行动		了解情况的时间不足,靠图形符号引起注意或按经验行动	
		有意识的	无意识的		
主观时间裕度	足够	短但够用	够用	短或不够用	极短
情况熟悉程度	从常规至新规则	从常规至重要任务	因为过于熟悉或常规而导致精力分散	略熟悉但不完全理解	情况完全无法辨认
关注的层级	中-高	中-高	低	高	过于关注
目标数	数个	1~2个竞争	1~2个竞争	数个	1个
下一步行为选择	预测基础	立案基础	常规立案基础	联想基础	随机
结果评价	很熟练	正常且周密	正常但随意	具体性的	情况完全无法辨认

11.3.2 人为错误的结构

人为错误包括以下三个方面:①错误的原因;②犯错误的人的行为特征;③失败行为的表现结果可以观察到。它们都是从时间因果关系来观察的,如果专就结果来观察人的行为,可以分为正确执行的行为和非正确执行的行为,而后者则根据行为错误的结果是否立即显现出来(或暂时藏而不露)又进一步

被分为:①错误查出后可纠正的行为;②错误查出后可容许的行为;③错误查出后无法纠正的行为;④错误无法查出的行为。

根据引起上述可观察的错误的人为内部行动机制和环境影响因素可以将人为错误的结构描述成如图 11.3 所示。它在 J. Rasmussen 提出的图解^[1]基础上附加了对人类特性的观测和分析度量。图 11.3 整理了错误显现的表面形态、内部认知处理阶段的错误机

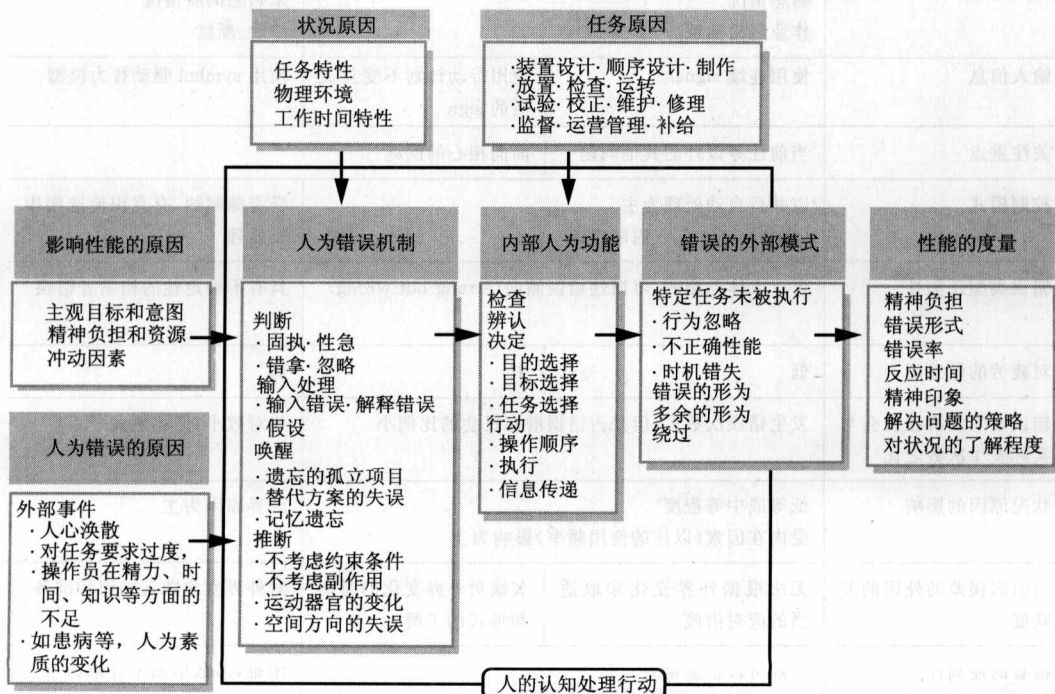


图 11.3 人为错误的组成图解

制,以及对它们施加影响的各种原因,还给出了评价接口性能时经常用到典型人为原因指标。

另外,从系统安全性来看,与其将其视为人为造成的结果,不如认为问题出在不安全行为作用于系统。J. Reason 按照不安全行为是有意的还是无意的观点,将人为错误做了分类,如图 11.4 所示^[4]。在这里,有意行为并不包括犯罪意图所引发的行为,即建立在人本性善的立场。但将违反列入有意行为的范畴。既然说到了违反,那么也就假定了社会规范的存在。

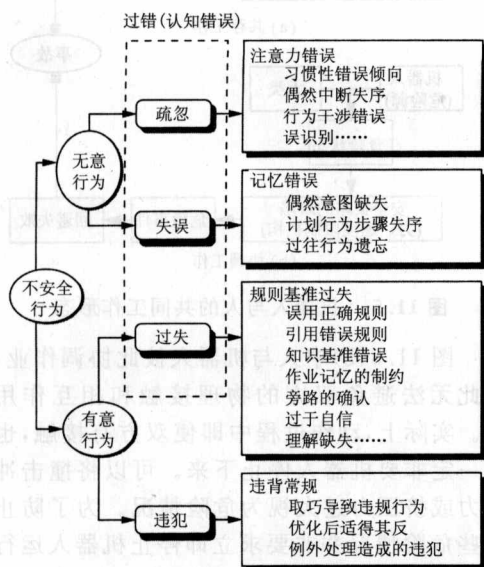


图 11.4 不安全行为的分类

11.3.3 人为错误的对策

考虑到包含人为错误在内的一般系统的安全对策时,为避免系统发生不期望的状况可以引入前兆事件(carrier),由此衍生出两种防护策略:一种是事前预防(preventive barrier);另一种是即使错误发生,但为了防止酿成重大事故而采取的防护(protective barrier)。

Hollnagel 把防护策略分为以下 4 种:①物理防护墙(墙、围栏、安全带、安全帽等);②功能防护墙(制动、互锁、密码、拉开距离的隔离带等);③图符防护墙(信号、警报、标签、命令、顺序书、许可证等);④抽象防护墙(规则、禁止、法律等)^[5]。将它们按照有效性、兼容性、导入时间、资源占用量、重要安全任务

的适用性、效果评价方法的简便性等观点整理成表 11.6。

对系统安全对策的上述分类,尤其在人为错误对策的形式方面基本上是根据 J. Reason 对不安全行为的分类出发的。图 11.4 概括了疏忽(slip)、失误(lapse)、过失(mistake)等的认知错误,它们与违反是有区别的。过错主要是人在信息处理方面出的问题,可以在个人级别上去理解,解决的措施以反复训练、作业环境的改进设计、记忆支持、优质信息提供、改善接口的智能水平等为主。相反,违犯主要是人的主观行动动机方面发生的问题,它应该从社会发展逻辑中得到答案。J. Reason 认为,目前普遍的情况是尚未考虑和预估到违犯安全作业规范的行为所造成的不良影响,因此忽视安全作业规范违规的人较多,采取的对策应该是转变态度、更新信念、完善规范、提高士气、改善文化,即强调安全文化的创建。

表 11.6 系统安全的四个屏障和特点

	物理防护	功能防护	符号防护	抽象防护
有效性	高	中—高	低—中	低
兼容性	中—高	中—高	低—中	低
导入时间	长	长	中	短
必要的资源量	中—高	中—高	中	低
重要安全任务的适用性	低	中	低	低
效果评价方法的简便性	易	中	易	难

吉川荣和

11.4 共存系统的安全性

11.4.1 危险分析和降低风险的步骤

在车间里作业的工业机器人一般都用栅栏等物理手段隔离开来,当人接近时靠某种停止机制来保证人身安全。其结果是机器人也好,操作员也罢,在实际示教和维护作业时因此而感到种种不便。为了将机器人从栅栏里解放出来实现与人在物理意义上的共存,如果仍然仅仅限于制定更加严格的限制规定,安全系统将停留停留在不允许人接近危险状态的水平,实际上那也是无法确保人身

安全的。

共存·协调型机器人与传统工业机器人的根本区别就在于其活动目的就是与人接近,与人接触。工业机器人对安全措施和安全规程的所有严格规定都不再适用于与人共存·协调的作业机器人。为了实施与人共存·协调型机器人的安全设计,人们需要在原有与机械安全有关的国际安全基本规格(ISO 12100 等)的基础上再一次开展降低风险的开发努力。

降低风险的方法事关机器人能否保证人身安全的大事,应该按照下面的顺序展开。

活动 1: 条件(环境)的完善

活动 2: 危险源的确认

活动 3: 危险源的排除(本质安全)

活动 4: 风险的估计·评价

活动 5: 基于设计降低风险

活动 6: 基于安全防护设备降低风险

活动 7: 残留风险的信息提供

其中,活动 4 是有关风险的评价问题。如果无法确认“安全”,那么应该进入活动 5 和活动 6,如果机器人达到“安全”,属于许可使用的阶段,那么应该进入活动 7,即完成操作员培训,采取保护措施后就应该认为风险降低了。即使是新型机器人,也不允许对机械设备的防护措施有任何懈怠,把避免事故的责任一概推给操作员承担。从这个意义上讲,降低风险的活动是一个过程,在这个过程中人们对机械设备防护措施进行确认,保证事故可以被杜绝。

风险评定中一件重要的事情是认定各种危险源,实际上在国际标准中已经对它们做了基本分类。表 11.7 是 ISO 12100 中列举的机械危险源的例子,应该排除和降低它们的危险。例如,机器人手臂的挤压或撞击就是一种潜在的危险源,操作员接近这个运动状态可能会酿成危险。又如,机器人撞上操作员的身体会引发事故,因此应该尽量不让危险状态发生,或者是发生危险状态时立即紧急将机器人制动。上述机器人与人的作业关系可以划分为如图 11.5 所示的两种形态。

图 11.5(a)中机器人和人虽然不协调作业,但两者共享空间,人可以接近机器人,称之为共存作业。例如,移动机器人与人接近会引发危险状态,因此移动机器人应该始终

监视前方,一旦有人接近就切换到低速行进或改换执行回避动作,避免继续接近。如果这些措施都失败了,那么当安全缓冲器与人发生软接触后机器人就会停止下来。不过,本节不打算涉及非接触传感器的作用问题,而关注安全缓冲器一类接触传感器在与人接触时防范危险事故的作用。

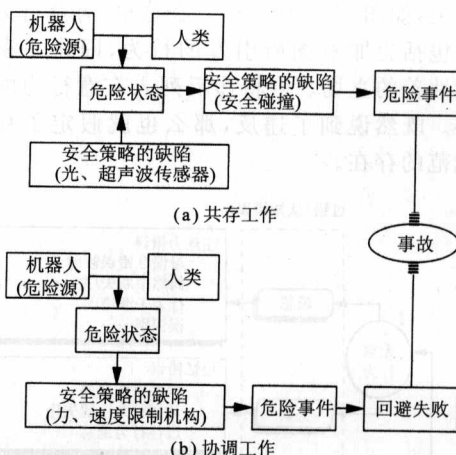


图 11.5 机器人与人的共同工作形态

图 11.5(b)中人与机器人彼此协调作业,因此无法避免双方的物理接触和相互作用力。实际上,动作过程中即使双方有接触,也不一定非要机器人停止下来。可以将撞击冲撞力或挤压力过大视为危险情况。为了防止这些危险情况并非要求立即停止机器人运行或转而处理保护操作员的问题,而是在人所能承受的允许范围内降低力的大小的问题。

表 11.7 降低机械危险源的风险

机械危险源	降低风险的措施
挤压/卷入	锋利边角倒棱
剪断	限制作用力
切伤或切断	限制质量和速度
冲击	遵守人机工程原则
吸入或夹住	针对控制系统设计
刺伤和刺穿	安全原则
(储蓄)能(源)部件功能不良	设计被动机构

11.4.2 共存作业形态的安全概念与技术

1. 靠停止运转实现共存型机器人定位

移动机器人这一类共存型机器人是无法

与人在空间上进行相互隔离的,只能通过停止机器人运转来确保安全。不过停止运转的特性会因机器人形态和操作人员的作用的不同而出现差异。表 11.8 给出基于停止运转的机器人的分类。

表 11.8 一共分成 5 个等级,序号越大安全性越高,对人的依赖越小。一般工业机器人大多在 3~4 级,通常列入 4b 级的“停止安全”有严格的责任要求。人和机器人共存作业的情况也一样,基本由确认安全状态全自动保护传感器防止人和机器人的接触。但是借助于非接触人体感知手段让移动机器人实现 4b 级是有困难的。排除危险源(降低风险活动 3)实际上也有执行方面的困难,所以往往改成按照活动 4 以下的降低风险活动来保证功能安全。

表 11.8 靠停止运转的机器人分类

等 级	特 性
1	对当事人是必需的,不允许拒绝使用(灾害救援机器人)。故障是致命的,但通过高可靠性和训练可以克服故障使用
2	不确保“停止安全”始终有效,靠控制或人的操作维持安全停止状态(飞机)。选择的判断由当事人做出
3	可确保“停止安全”,但危险的判断和停止操作靠人完成(机器人示教,机械臂手动)
4	可中止“安全/危险监视和安全停止”功能,但人不参与操作(机器人自动运行)
4a	检查出危险后强制执行停止的控制命令(无人搬运车)
4b	无法确认则停止运转以确保安全,确认后安全后运转
5	具有 4b 的特性,通过控制可以撤销暂时无用的安全停止。在确保安全下能保持使用的高效率

2. 基于传感器分层的行驶控制

移动机器人的一项重要的安全功能就是在接触人之前靠传感器感知,并借助于制动器进行停车。实际上,降低风险的容许程度依赖于传感器和制动器的安全性能。从机器人本身的质量和制动能力考虑,我们必须根据它行驶的速度来选定相应的传感器和制动器。一般来说,高速到低速的切换靠非接触障碍物(人体)传感器的感知信号控制再生制

动减速,而从低速到停止靠软接触式的缓冲器开关的接触感知信号触发无励磁电磁制动器进行制动。也就是说,因人与机器人之间距离而异风险也不同,高风险需要更高的安全机制。

这种按照传感器和开关的分层控制概念可以归纳成图 11.6 的互锁机制。其前提是不允许传感器、开关、控制器出现危险过失,例如,尽管人处于传感器感知空间内,却误报“没人”是万万不可的。实际上,很多无人搬运车都配备有检测危险的传感器或开关,不过也有人建议用超声波传感器、缓冲器开关等^[1]。

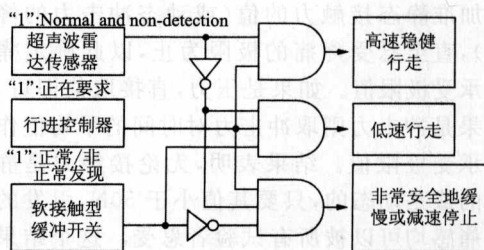


图 11.6 行走控制的分层互锁机制

不过,如果启停控制是由操作员手持操纵盒来进行开关的,有时仍容许人在接触到缓冲器的状态下机器人仍然以极低的速度(包含停止前的减速过程)运行。至于设置行驶速度监视机制的必要性和接触所容许的速度问题我们将在另外的篇幅中进行讨论。

11.4.3 协调作业形态的安全概念与技术

1. 基于人体工程学实验的机器人安全技术的极限规范

与人协调作业时,机器人应该安全地与人接触。此时应视手臂为危险源,如果按照降低风险活动 3,为了安全起见应该去除机器人的手臂,显然那就丧失了作为机器人的本质,是因噎废食。于是人们就想是否可以用物理特性(力、速度)取代手臂这个危险源,改进结构设计以便为人们所能承受。近年来有人开始关注由速度引起的恐惧的心理评价问题、脑震荡冲击力限度和安全的评价方法等^[2]。人们从人机工程学的观点出发,将人体上肢抵抗机械压力的极限和身体表面主要部位承受痛觉的极限以力的单位加以定量描

述,以此作为接触时人的极限承受规范,具体方法如下所述。

首先开展身体表面主要部位承受机械接触痛觉的极限试验^[3]。慢慢增加机械刺激量,当被试验者认定疼痛感达到主观极限时即将该值定义为机械刺激量的承受极限值。实验中施加于被试验者的机械刺激分为静态、动态两种情况,机械刺激量分别对应于压力和冲击力。接触探针采用 $\phi 10\text{mm}$ 的黄铜圆片。

实验共选择 12 处机器人与人发生接触可能性较大的部位(或疼痛的敏感部位)作为测定部位。被试验者自行启动执行器,缓慢增加准静态接触力的值(或动态冲击力的峰值),直至忍受疼痛的极限为止,以此确定痛觉承受极限值。如果是压力,直接取值即可,如果是冲击力则取冲击力对时间的平均值作为承受极限值。结果表明,无论接触力是静态的或是动态的,只要其值小于 50N,引发的疼痛感均可以被所有试验者忍受。这个结果对选定机器人外部被覆材料的黏弹性参数有参考价值^[4]。

接着人们开展人体上肢推挡对面机械压力的研究^[5]。被试验者各自让背部与水平面成 0° 、 30° 、 60° 的任一姿态角并保持向前弯曲的姿势,两手握着位于 50cm、100cm、150cm 的任一高度的把手,最初的 2s 内以 50cm/s 的速度慢慢用最大的力进行挤压(或拉),并要求在随后 3s 内保持身体姿势不变。下半身膝盖则应该伸直并被固定。

实验数据按照不同性别、动作、模式、姿势、高度进行分类处理,把平均值设为 100% 来评价最高(低)值,以及与平均值的偏差。结果是,无论条件如何,男女之间明显存在差距,拉力的偏差又大于压力。此外,在采取中腰姿势和等速、等距离、等条件试验时,记录的最大值大体与预想结果相差不大。特别从女性的平均值和分散值还可以发现,压力数据的分散状况仅为 5% 左右。这些数据为制订机器人高可靠性力检测机构的标准提供了参考,在制定 IAD(Intelligent Assist Device)相关的安全 ANSI 规格时已经被采纳。

2. 基于力输出限制机构的本质安全化

为了降低机器人手臂与人体接触带来的

风险,有人提出靠紧急停止或靠控制停止两种方案。但有时仍然需要优先级更高、具有本质安全的措施。例如,有人提出一种可变化宾厄姆流体的限力输出机构(图 11.7)^[1],它从本质上限制电机-减速器造成的机器人手臂的冲击力。原理是将磁流变体(MR: Magnet-Rheological)注入离合器/制动器中加以密封,流体的屈服剪切应力受控于外部电磁场,当冲突发生时能有效地切断电机等惯性矩的影响。

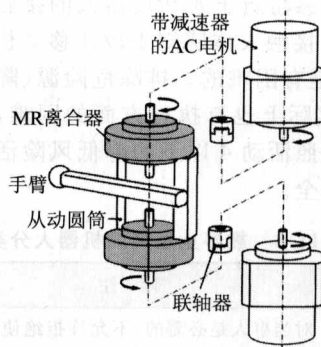


图 11.7 利用磁流变体的力输出控制机构

把人体特性用到机器人手臂动能的热耗散过程可以大大改变撞击部位上原本十分巨大的冲击力。为了确保撞击的安全性,工程上的一个重要手段就是把动能耗散过程分解到力(制动力)和距离(制动距离)上去处理。巧妙地利用这样的手段,使人体所承受的动能热耗散最小,这是实现本质安全的唯一方法。

杉本 旭 池田博康 山田阳滋

11.5 基于共存系统的协调动作和行动

11.5.1 人与机器人的协调

1. 人机共存系统

在机器人领域,从古至今有很多关于机器人自主和智能的设想。不过,反过来看,实现机器人的高度自主和智能绝非是一件容易的事情。

人类以极高的智能水平存在于自然界,这包括以视觉为首的高级感觉器官、以传感器获取的信号为基础进行认知、适应、学习等丰富多彩的信息处理的大脑,以及执行灵巧运动的手足肌肉骨骼系统。于是,有人构想

出以人所持有的智能中枢为本,使之与机器人的运动控制结合起来,以便实现一个满足灵巧搬运·操作物体等作业的机器人系统,把这样的系统称为“人-机器人共存系统(human/robot coexistence system)”。

在若干领域,如难以实现机器人完全自主的产业领域,在十分在意给对象带来心理安慰的护理领域,或者在希望动力假肢和支援机器人提供随心所欲的服务的康复领域,这样的系统呈现出越来越大的重要性。

2. 人与机器人共存系统的形态

人与机器人共存系统里一般有人、机器人、作业对象物三者。根据它们之间的依存关系衍生出三种系统形态。在本节把人、机器人、对象物分别以符号 H、R、O 标记,于是这三种形态分别如下:

(1) H-R-O 型 人操作机器人,机器人操作对象物的形态。这种形态适合搬运重物。

(2) R-H-O 型 人边操作机器人边操作对象物。这种形态既需要靠机器人提供助力机构,又需要人手部有足够的灵活性来操作对象物。它主要用于自助、护理等康复领域。

(3) H-O-R 型 人和机器人一起抓住对象物,完成协调操作的形态。

3. 人与机器人共存系统和机械阻抗

正如 11.5.2 节中将详细叙述的那样,人的肌肉骨骼系统具有随意调节机械阻抗(mechanical impedance)的特性,这种特性赋予手足灵巧运动的机能。可见为了使用人与机器人共存系统完成灵巧作业,同样需要把类似人的这种特性控制嵌入机器人系统。阻抗控制(参见第 3 篇 2.4 节)恰恰就是满足这种控制的方法。把 H-O-R 型系统想像成 H-O-H,不过在这个两人协调搬运作业中一个人(H)被替换成 R。为了把人的肌肉骨骼系统的可变机械阻抗特性映射到机器人上,很容易想到可变阻抗控制也许很有用^[2]。另外,因为 H-R-O 型系统中可以将 R 视为一种“工具”,由此期待机械阻抗能够巧妙地控制该工具实现合理的助力功能^[3]。可见,在人与机器人共存系统中,机械阻抗及其控制思想在将人和机器人结为一体方面发挥着重要的作用。

4. 本节的组成

本节首先在 11.5.2 节里说明人体肌肉骨骼系统机械阻抗可变的机制,同时概要地介绍一些手机械阻抗的测量结果。在 11.5.3 节把 H-R-O 型或 R-H-O 型人与机器人共存系统统称为“手动控制方式”并做一些介绍。最后在 11.5.4 节里以 H-O-R 型(本节最后称为“协调控制方式”)人与机器人共存系统为重点解释与人协调进行搬运作业的机器人的阻抗控制实例。

辻 敏夫 森园哲也

11.5.2 人体肌肉骨骼运动系统的特点

图 11.8 表示了随意运动的控制流程^[4]。由来自视觉、听觉、触觉等感官系统传来的外部刺激,或者自身的内部刺激汇聚在大脑皮层(cerebral cortex)联合区引发运动意图。运动前区和补偿运动区负责运动的前期启动和规划的任务。此时小脑外侧部分担当运动动态模式的计算,其功能是通过学习获得的。大脑基底核则抑制引发运动的信号,直至满足当前逻辑关系后才去抑制并选择合理的运动。

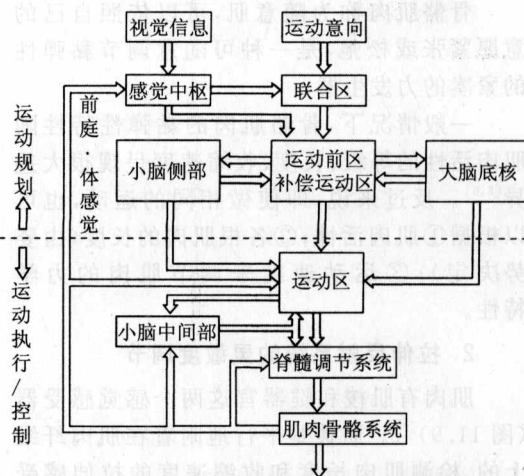


图 11.8 随意运动控制的功能的构成^[4]

运动区在接到上述过程形成的运动命令后,向脊髓运动神经输出,由脊髓 α 运动神经直接把信号送往肌肉,同时接受内部传感器(肌梭和腱感受器)的反馈信息,构成反射系统。运动区的信号还同时送到小脑中间部,在此按照脊髓接收的反馈信息对运动命令和参数进行调节。当然脊髓的反馈信号也被送

到体感觉区。

人的运动能力在很大程度上取决于上述部分之间的动态关系,它的重要特征在于肌肉自身具有爆发运动的优异的能力。肌肉是能发出强劲力量的非常紧凑的执行器,不但输出力,还具有类似弹簧或阻尼的性质,而且这种特性还受控于人体。例如,突然对手臂肌肉施力,手臂就立即变得强硬,反之力松脱之后手臂又恢复到十分柔和的状态。

本小节将人运动的刚硬和柔软用机械阻抗(mechanical impedance)来描述。机械阻抗是用来描述运动变量(位置、速度、加速度)与力、力矩之间的关系的物理量,是刚性(stiffness)、黏度(viscosity)、惯性(inertia)的总称。运动控制的本质是如何控制与环境之间的复杂相互作用。这说明它不仅需要针对位置和力,而且需要对运动和力之间的相互约束关系即阻抗加以积极的控制。

人的运动系统具有下面三个调节阻抗的功能:①骨骼肌肉的可变黏弹性;②拉伸反射系统的参数调节;③肌肉骨骼系统的力学结构。下面对各个功能进行简单的说明。

1. 骨骼肌肉的可变黏弹性

骨骼肌肉称为随意肌,可以依照自己的意愿紧张或松弛,是一种可随意调节黏弹性的紧凑的力发生器。

一般情况下,骨骼肌肉的黏弹性特性随肌肉活性的等级、长度、收缩速度呈现很大差异^[5,6]。反过来说,即使做相同的运动,也可以根据①肌肉活性;②各根肌肉的长度(由姿势决定);③运动速度来调节肌肉的力学特性。

2. 拉伸反射系统的灵敏度调节

肌肉有肌梭和腱器官这两个感觉感受器(图 11.9)^[7]。肌梭是平行地附着在肌肉纤维上的、检测肌肉长度和收缩速度的拉伸感受器。如果受某种作用肌肉被拉伸,肌梭的脉冲频率将增大,使脊髓 α 运动神经兴奋,形成被拉伸肌肉的收缩,即负反馈控制系统(拉伸反射系统)。此时肌梭受脊髓 γ 运动神经传来的伸长 γ 运动纤维的支配。换言之,可以由上级中枢实现对速度反馈增益(与收缩速度有关,相当系统黏性)和位置反馈增益(与肌肉长度有关,相当系统刚性)的调节^[5]。

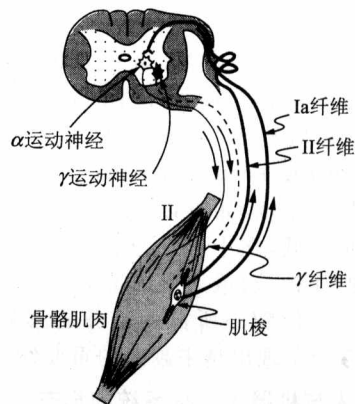


图 11.9 骨骼肌肉和拉伸反射系统

3. 肌肉骨骼系统的力学构造

肌肉阻抗经由骨骼系统的力学结构传达到手部,是手部阻抗的发生源(图 11.10)。姿势一旦发生变化,肌肉到手部的传递特性就随之发生变化,手部阻抗也发生相应的变化。反过来,通过姿势选择也可以调节手部的阻抗。

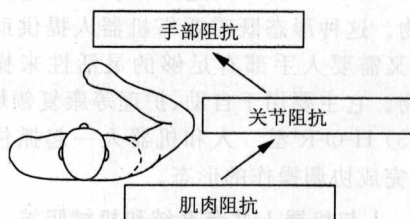


图 11.10 生体运动与阻抗

我们知道,向各个关节施加作用的肌肉不止一根,而是多根,各个关节至少有不少于一组呈颌顽状态配置的肌肉。如果同时收缩颌顽肌肉的话,可以在不向外部输出力和运动的条件下,提高肌肉的活性等级,使关节紧张起来。

为了了解人体上肢多关节运动时手部的阻抗情况,Mussa-Ivaldi 等^[9]对保持一定姿势的手部进行了刚性测量。随后,Dolan^[10]、辻等^[11~13]把测量实验扩大到刚性以外的黏性、惯性等。五味等^[14]测量了处于运动状态的手部阻抗。关于上肢姿势与手部阻抗的空间特性在文献[9~12]中做了阐述,关于肌肉收缩与手部阻抗的变化特性在文献[13]中有详细阐述。本节简单地介绍文献[11~13,15]中涉及的手部阻抗的测量结果。

图 11.11 将手部惯性矩阵 M 用惯性椭

圆^[16]来描述,椭圆长轴方向表示惯性大,短轴方向表示惯性小。由图 11.11 可知,手臂姿势发生变化,则作业坐标系中惯性椭圆的方向就出现变化。图 11.11 中的虚线表示从手臂运动方程式计算得到的手部等价惯性,两种椭圆的特征匹配得相当一致,由此可知人体手部的惯性特性基本上是由手臂姿势和重量等力学特性决定的。

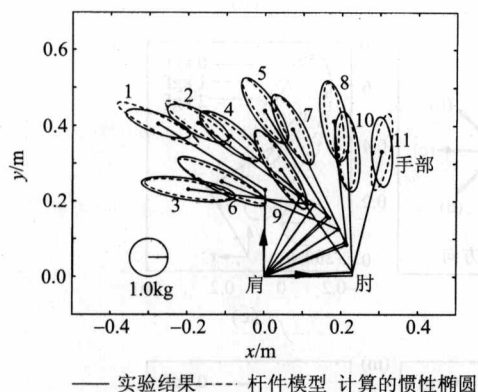


图 11.11 保持姿势时手部的惯性

图 11.12 和图 11.13 同时测量了刚性椭圆、黏性椭圆,它们分别对应于刚性矩阵 K 和黏性矩阵 B 。每个椭圆的长轴方向度对应着大刚性和大黏性。由图可知以下 4 点特性:

- ① 刚性椭圆的长轴几乎都指向被试验者肩的方向。
- ② 手部位置越靠近身体,椭圆越朝逆时针旋转。
- ③ 手部位置越远离身体,椭圆的形状变得越细长。
- ④ 刚性椭圆和黏性椭圆彼此的特征极为相似。

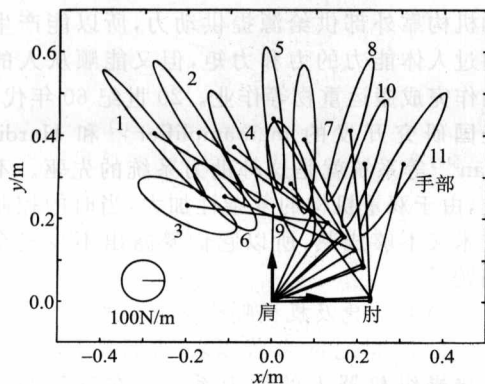


图 11.12 保持姿势时手部的刚性

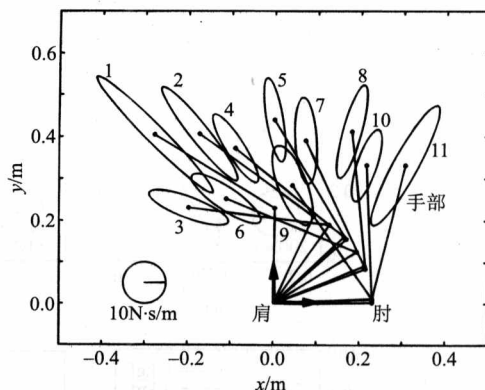


图 11.13 保持姿势时手部的黏性

这些特性与被试验者或测试的时间无关^[9~16]。

图 11.14 给出在被试验者手部有力发生的条件下所获取的刚性椭圆。手部施加力的方向如图 11.14 中央(a)~(h)所给出的 8 个方向,它们的大小分别是 $1 \times 9.8\text{N}$, $2 \times 9.8\text{N}$ 。图 11.14 中的实线椭圆表示手部在未施加力的条件下测定的结果。为了在手部施加力,应该按照力的方向适当地收缩肌肉。由图 11.14 的刚性椭圆可知:

- ① 肌肉强烈收缩,则手部的刚性增加。
- ② 手部力的方向不同收缩的肌肉也不同,手部刚性椭圆的方向和形状也会发生较大的变化。
- ③ 沿椭圆长轴方向施加手部力的场合(图 11.14 中(a)、(d)、(e)、(h))和沿在短轴方向施加力的场合(图 11.14 中的(b)、(c)、(f)、(g))相比,后者对应的刚性椭圆更大。

本节介绍了人体运动阻抗调节机构和多关节上肢运动时手部阻抗特性的测量结果。人阻抗特性的测量结果所提供的基础数据对接近人手臂功能的假手等人工假肢的开发,或者人-机器人系统协调作业问题的研究都具有十分重要的参考价值。在下一节里我们将介绍基于机械阻抗的人与机器人协调系统的具体实例。

辻 敏夫

11.5.3 手动控制方式

本节将对 11.5.1 节中的 H-R-O 型和 R-H-O 型提及的“手动控制方式”的人-机器人共存系统进行解释,特别将涉及助力系统和动

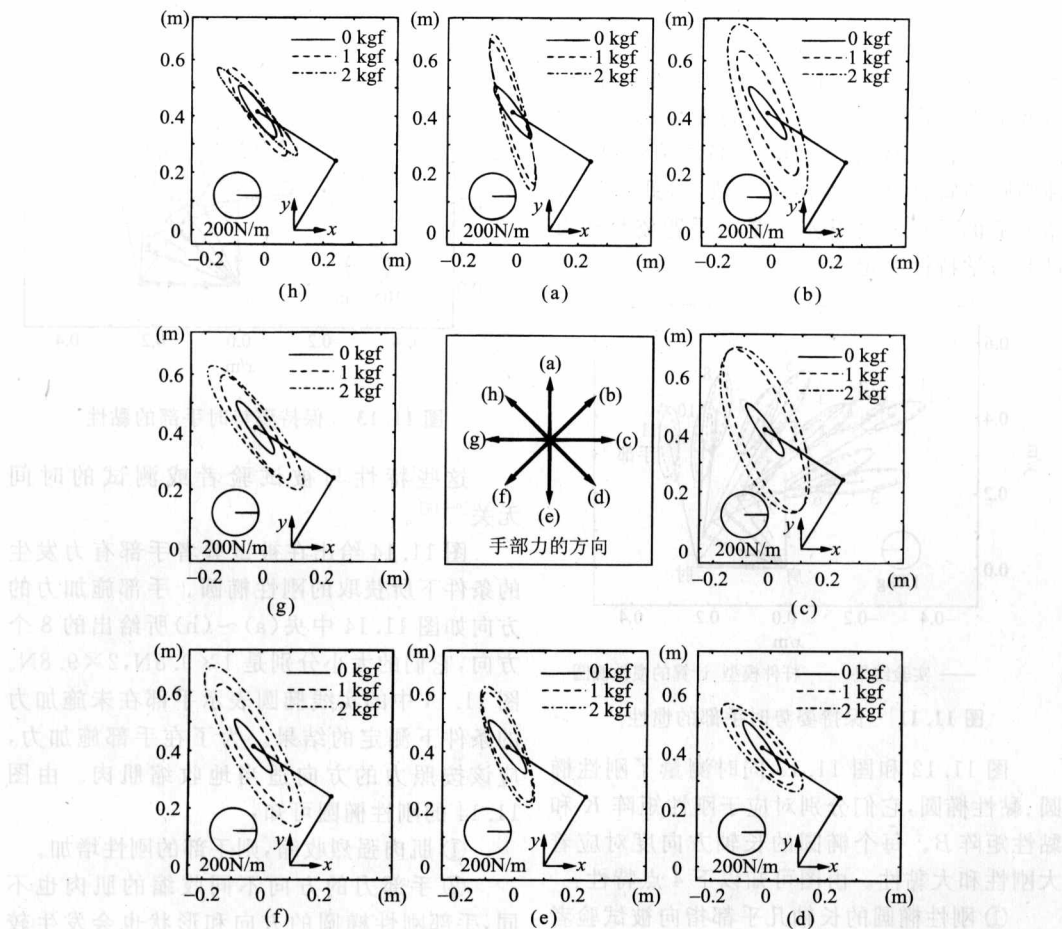


图 11.14 手部力与刚性的关系

力假肢。实际上,远程操作系统里也包括这样的共存系统,在本篇第6章里已经有详细的讨论,请读者参照。

1. 助力系统

如11.5.1节所述,人类具有高级智能。但是由于受到人体机械强度的限制(如肌肉骨骼系统的强度、肌肉所能发生的力的大小等),所以无法完成超过极限的重物搬运等作业。值得庆幸的是,现代技术已经能够设计和制作出功率远远胜过人类的机器人。因此,为了发挥人和机器人两个方面的长处,人们提出了以人的智能为控制核心,在功率上又能弥补人力不足的系统。这个系统一般被称为“助力系统”(power assist system)。下面我们来概括地介绍一下这种控制方式的几个要点。

1) 主从方式

为了测量人的动作,可以在主动机构的外侧设置一个受控的从动机构(如同跟踪主动机构一样),构成所谓的双重机构方式。人通过主动机构使从动机构进行运动。由于从动机构靠外部供给源提供动力,所以能产生超过人体能力的力和力矩,但又能顺从人的动作完成搬运重物等作业。20世纪60年代,美国研究开发的man-amplifier^[17]和Hardiman^[18]等系统就是这种助力系统的先驱。不过,由于双重机构的复杂性加大,当时的控制技术又不够成熟,所以它们暴露出不少安全问题^[19]。

2) 助力比及机械阻抗控制方式

自20世纪80年代以来,人们着手研究人直接操纵机器人的助力系统。在这种系统中,人将想要操作的力(操作力)施加到机器

人上。此外,在 H-R-O 型系统中,对象物体等来自外界的力(外力)也施加在机器人上。在下面,我们按照助力比、机械阻抗(以下简称阻抗)两种机器人的控制方式分别进行说明。

为简单起见,下面以图 11.15 所示的单自由度系统为例进行说明。图 11.15 中质量 M 、黏性系数 B 的机器人被施加操作力 f_h 和外力 f_e 。这些力被各种力传感器所检测。为了容易理解,假设 M 、 B 的值均已知,机器人的位移 x 和速度 \dot{x} 也可以测量得到。机器人产生的力以 f_r 表示,则机器人的运动方程式如式(11.1)所示:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + f_e = f_r + f_h \quad (11.1)$$

(1) 助力比控制方式 这里将与操作力放大倍数有关的参数称为助力比 α , 则有

$$f_r = (1 - \alpha)f_e \quad (11.2)$$

代入式(11.1)得到

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + \alpha f_e = f_h \quad (11.3)$$

在人看来,感觉到外力增加了 α 倍。如果设定 $\alpha < 1$, 由上式可知能够起到增大操作力的作用。Extender 等^[20]就属于这个方式。

(2) 阻抗控制方式 用下式取代式(11.2)。

$$f_r = \left(B - \frac{M}{M_d}B_d\right)\dot{x} - \left(1 - \frac{M}{M_d}\right)f_h + \left(1 - \frac{\alpha M}{M_d}\right)f_e \quad (11.4)$$

代入式(11.1), 得到

$$M_d\ddot{x} + B_d\dot{x} + \alpha f_e = f_h \quad (11.5)$$

式中, M_d 、 B_d 分别为打算让机器人持有的目标阻抗参数值(目标惯性值和目标黏性系数值)。式(11.4)不仅可以使对外力的助力比变为 α , 且可以把机器人的阻抗参数值设定为 M_d 、 B_d 。这个形式被称为“假想工具动力学”^[21]。最近有人提出根据作业的状况调节 M_d 、 B_d 的控制方法(可变阻抗控制)^[22,23]。

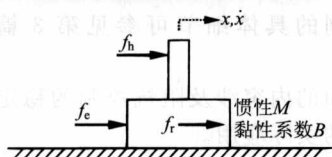


图 11.15 自由度系统的例子

当然,有些场合 M 和 B 的值难以推测,或者难以用力传感器测量,或者自由度超过 2,

这是就需要借助于更高级的控制规则。

3) 助力比·目标阻抗的设定

为了使 2) 中所述的助力系统为人提供合理的助力,应该设定比较合适的助力比值以及目标阻抗值。为此,人们开展了有关操作系统时操作员手臂阻抗特性的基础研究,从这些实验结果定量地掌握了阻抗特性^[24,25]。这些研究表明人是可以随机器人阻抗的变动相应地调节自己手臂的阻抗的。有人让具有适当助力能力的机器人执行所谓的“定位”作业,即把物体搬运到给定位置的试验,由此观察阻抗的变化^[22,23]。结果发现,如果在接近对象物定位点的过程中让机器人的粘性系数逐渐增加,就能够提高作业的效果和主观操作感,甚至感觉作业负担有所减轻。此外,有人提出所谓的“接口”方案,它以人为调整机器人阻抗为前提,构成一个更易满足操作员“意愿”的阻抗模式^[26]。

2. 动力假肢

根据假肢是否附带外部动力源,可以分成两类:利用某种外部驱动源(包括穿着者自身其他部分产生的力)驱动关节的假肢称为主动假肢,特别地,把引入人力以外的驱动源(液压、马达等)的假肢称为动力假肢^[27,28]。理想的动力假肢控制应该让穿着者(失去了自然肢体)达到与手足健全时同样随心所欲的水平。为了实现这个目标,研发努力一直延续至今。其中,很多研究都涉及到机电假手(以肌电位为驱动方式的假手),在这里举一些具体例子。

肌肉纤维接收到来自连接肌肉的运动神经细胞传来的信号后引起所谓的去极化现象产生肌电位。把碟状圆片电极贴在皮肤表面就能检测到肌电位,该信号称为表面肌电位信号(surface EMG signal; surface electromyographical signal)。本节在下面一律简称为 EMG 信号。EMG 信号属于微弱信号,显示随机交流波形^[29]。

人的中枢有一个特点,就是一旦建立起四肢的控制功能后,即使神经被切断,这种功能暂时也不会消退。即原来从切断残留部分(切断端)靠近躯体一侧的肌肉中取得的 EMG 信号,在切断后仍保留反映人的运动意愿以及调整肌肉骨骼系统阻抗的信息。假手控制已

经确认了 EMG 信号的实用价值,所以迄今为止人们开展了大量有关机电假手的研发和实用化工作。代表性的成果有 Swedish Hand、Otto Bock Hand、Fidelity Hand、Vienna Hand、Boston Elbow、Inail Hand、Utah Arm 等^[30,31]。日本的 WIME 手也得到实际应用^[28]。

在机电假手控制方面存在着 EMG 信号与假手运动之间的相互关系如何建模的问题。其起因在于 EMG 信号受到脊髓反射系统、肌肉骨骼系统结构、肌肉疲劳、电极安装位置、该位置处皮肤的特性(电气阻抗等)等多个因素的影响,结果给 EMG 信号与假手运动关系的分析和建模造成极大的困难。于是,有各种建模方法和实验评价方法出台。简单的有先将 EMG 信号整流和滤波,然后建立它与关节角速度关系的方法^[32]。后来又有基于线性模型的方法(如判别函数、AR 模型等)^[33~36]。最近提出不少利用神经网络的方案^[37~41]。考虑到 EMG 信号与假手运动之间的关系可能属于未知的非线性映射关系,如此说来,利用学习所获得的非线性映射关系的神经网络可能对机电假手控制更有参考价值。

让机电假手也像人一样具有随意调节肌肉骨骼系统阻抗的特征(参见 11.5.2 节)使之更接近自然手是十分必要的。为此有人建议将 EMG 信号与机电假手的阻抗控制结合的控制方法^[42~45]。

最近,已经出现了应用机电假手控制方法的新型人类支援假手^[46],以及助力系统的成果^[42~45]。

森园哲也

11.5.4 协调控制方式

协调控制方式是指与人动作相协调的机器人的动作方式,图 11.16 举出一个贴切的例子,是让人和机器人协调搬运一件重物。

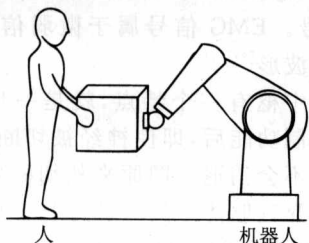


图 11.16 人和机器人协调搬运行业

1. 负载分配与阻抗控制

为简单起见,我们来看图 11.17 所示的一个人和一台机器人沿水平方向协调搬运重物的例子。物体位移为 x ,人施加的力为 f_h ,机器人的力为 f_r ,运动方程式为

$$m\ddot{x} = f_h + f_r \quad (11.6)$$

式中, m 为物体的重量。

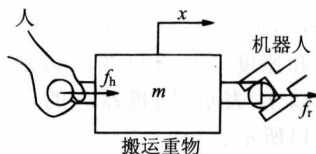


图 11.17 人-机器人沿水平单自由度协调搬运作业

为了针对机器人与人的协调作业实施控制,有必要求解机器人施加的力 f_r 。从式(11.6)解得 f_h, f_r 分别为

$$\left. \begin{aligned} f_h &= \alpha m\ddot{x} + f_{int} \\ f_r &= (1-\alpha)m\ddot{x} + f_{int} \end{aligned} \right\} \quad (11.7)$$

式中, f_{int} 为内力; α 为搬运物体时决定惯性负载如何往人和机器人分配的系数,若 α 为 1,表示人承受全部的惯性负载。

目前提出的方案主要都是由人来承受惯性负载。于是上式变为

$$\left. \begin{aligned} f_h &= m\ddot{x} + f_{int} \\ f_r &= -f_{int} \end{aligned} \right\} \quad (11.8)$$

机器人只发生内力。

在上述假设下,小菅提出可以把机器人看成弹簧、质量、阻尼器组成的假想工具,基于假想工具动力学产生内力的方法实施协调控制^[47]。此时机器人阻抗控制(参见第 3 篇 2.4.2 节 3)可简单地按下式实现:

$$f_r = M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx \quad (11.9)$$

式中, M, C, K 分别为假想质量、阻尼系数、弹性系数。

目前协调控制研究多数依据阻抗控制方式。控制的具体细节可参见第 3 篇 2.4.2 节 3。

下面的内容涉及阻抗控制的稳定性和阻抗控制的实际应用。

2. 稳定性

11.5.2 节给出了人的肌肉骨骼特性,从中可知阻抗是允许自由变化的。这就是说,虽然单个机器人的控制是稳定的,但是整个

系统可能受到来自人一側阻抗特性的改变而变得不稳定。

在稳定性的判别方面,有 Al-Jarrah 等^[48]的小增益定理、小管^[47]的 Popov 超稳定定理、池浦^[49]的劳斯-赫尔维斯稳定性判据等。池浦发表的结果引人注目,他认为在机器人刚性比人小的条件下,若机器人的黏性不大则容易发生不稳定。

这就是说,为了实现如人一般柔软的阻抗需要谨慎行事。人们已经掌握,定位控制时人会提高自己手臂的刚性,而一旦手臂的刚性提高后,机器人一側的刚性就显得低了,于是容易导致不稳定。为了把物体摆放到桌上或紧贴墙壁运动,由于对方的刚性非常大,也容易出现不稳定。

如前所述,应该通过提高机器人的黏性来避免这一类不稳定。但是这样做又反过来加重了机器人的操作负担。所以,池浦等提出可变阻尼控制法,即停止搬运物体的时候增大黏性,移动的时候减小黏性,这样就既减轻了操作的负担又保证了稳定性^[49]。

3. 阻抗控制存在的问题

让物体上下移动。如果把阻抗控制的坐标原点设在机器人手部,为了按照图 11.18 所示上下举放物体,不仅需要上下的平移力,还需要力矩。如果把坐标原点设在人的手部,那么就只需要平移力了。但是如论何种形式都需要平衡物体产生的力矩。如果改换成搬运桌子等物体的作业,此时人和机器人均处于抓取状态,处理桌子的力矩一般来说

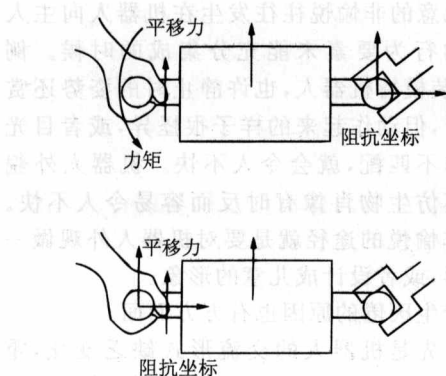


图 11.18 提升重物时阻抗坐标与力的关系

都相当困难。由此可见,仅靠阻抗控制很难完成协调作业。

解决问题的方法是与其检测机器人手腕的角度还不如检测物体的倾角,即控制物体保持水平^[50]。不过此时应该减小手腕的刚性和黏性,否则容易导致系统的不稳定。

田隆等建议一种方法,将机器人的手部假想为车轮,物体和机器人恰如一辆车^[51]。此时即使机器人的手部位于阻抗原点,无需施加力矩就能搬运物体。但如果举放物体,就不得不将物体斜举改变方向,否则会出现无法实现自然协调的问题。

4. 模仿人的方法

着眼于人的阻抗变化特点,Al-Jarrah^[52]和池浦等^[49]提出阻抗可变化的控制方法。

Al-Jarrah 将阻抗定义为

$$A f_r = C \dot{x} + K x \quad (11.10)$$

改变增益 A 的方法是

$$A = \lambda [1 - \exp(-\alpha |f_r|)] \quad (11.11)$$

它反映了肌肉的特性,即根据发生的力,让阻抗增益以指数函数形式变化。

池浦等测量和分析了人互相协调搬运的特性,并以阻抗变化的形式表示出来。设物体开始移动的时刻为 0,阻抗的变化如图 11.19 所示。图 11.19 与 Al-Jarrah 的研究结果一样,揭示出黏性系数变化的规律呈现指数函数的形式。将这个特性移植到机器人上,开展机器人与人的协调实验,就能实现自然的搬运动作。

池浦良淳

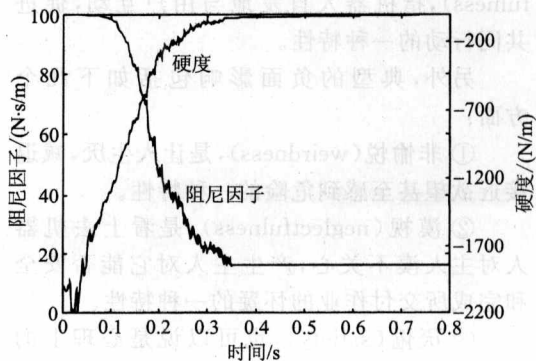


图 11.19 人的阻抗变化

11.6 共存系统亲和性的表现

11.6.1 亲和性的表现

1. 表现亲和功能的必要性

在开发机器人的时候,如何满足用户心理上的亲和性(familiarity)是一个大问题。在机器人中,已经出现一类在形态上与人或动物类似,又能自主智能行动的机器人,可见用户希望机器人拟人化的心理倾向是相当强烈的。

事实上,应该避免与人相互作用的机器人给对方带来心理上的不适或不快,或者反过来说,应该令对方既亲切有愉悦。

我们知道,娱乐机器人的主要目的原本就是带给用户心理上的愉悦感。在这一理念的指向下,人们甚至开发出让用户身心放松的、具有医学效果的机器人。

2. 亲和感的内容

其实,机器人的亲和感既会给用户带来正面的影响,有时也会带来负面的影响。

典型的正面影响包括如下几个方面:

① 可爱(cuteness),属于诱发用户“保护幼小”的养育本能的一种特性。

② 友好度(friendliness),是用户无恐惧感,乐于与机器人接触和亲近,在无压力的心理状态下随意对机器人发号施令的一种特性。

③ 驯熟度(tameness),主人发出少量指示即可遵从主人意图行动的一种特性。

④ 交流积极性(light-heartedness, playfulness),指机器人自发地与用户互动,促进共同行动的一种特性。

另外,典型的负面影响包括如下几个方面:

① 非愉悦(weirdness),是让人生厌,减退接近欲望甚至感到危险的一种特性。

② 漠视(neglectfulness),是看上去机器人对主人漠不关心,产生主人对它能否安全和完成所交付作业的怀疑的一种特性。

③ 厌倦(satiety),也可以说是心理上的饱和(psychical satiation)。随交流时间的延伸,用户对机器人的交流欲望减退的一种特性。

当然,上面举出的影响是互不独立的。

需要注意,出于文化背景不同,亲和性的含义也会有所区别。正文中虽然对亲和感的内容采取中英术语对照的表达形式,但表达彼此的微妙差异很难。根据机器人的使用目的不同,有时甚至还需要考虑其他内容。

3. 表现亲和性的原理和方法

亲和性各有内在的因素。机器人控制这些因素,就能表现出不同的亲和性。

可爱,按照 Lorenz^[1]的观点可以通过幼儿的特征呈现出来。具体如眼睛在脸部所处的位置较低、近似球形的体型、笨拙的肢体动作、语调高亢、喃语等特征往往能够诱发出人的抚育本能。

友好度,可以通过机器人靠近主人身边,用言语和肢体动作表现作业的快乐,对主人的命令快速反应等。

漠视,反过来如果在表现上缺乏上述友好特征就会让人产生漠视感,让人感到面对的机器人不友好,而是冷冰冰的、无个性的普通机械,结果主人有时会同样漠视机器人,不在意它的存在。

驯熟度,机器人模仿主人的行动,或者事先体察主人的意图使服务体贴入微,这些行为都可以表达驯熟度。

交流积极性,由机器人在适当的时机通过发声、发言、接触等自发地与人的互动来表现。

非愉悦的表现分为有意、无意两种情况。机器人扮演成怪物的样子就属于有意的情况。

无意的非愉悦往往发生在机器人向主人展示的行为要素未能充分集成的时候。例如,时装模特机器人,也许静止时的姿势还赏心悦目,但动作起来的样子很怪异,或者目光与动作不匹配,就会令人不快。机器人外貌过度模仿生物肖像有时反而容易令人不快。克服非愉悦的途径就是要对机器人外观做一翻改形,或者设计成儿童的形象。

产生厌倦的原因也有方方面面。

首先是机器人的交流形式缺乏变化,重复拖沓。往机器人行动中加入偶然因素,或把对象人数设置为多人,有针对性地赋予交流变化,以此克服厌倦。

对机器人关心过度或期待过高,或反过

来过小,都容易引发厌倦感。

防止这类情况的措施是让用户掌握改变机器人职责和能力的主动权。例如,用户可以改造机器人,即让用户参与机器人职责和能力的设定。

除此以外,令人不快的外观、操作的复杂度过大或过小、机器人毫无目的的行为、机器人行为与用户自身无关联等原因也都可能令人生厌。

4. 亲和感的测量和评价

测量机器人给予用户亲和感的程度,可以从下面的内容中选择:数据解释方面的学术依据、测量的即时性、再现性、选好性(对想测量的内容的可选择性)、被试验者的诱导效果、被试验者的负担、测量成本等。

上述方法大致可以分为两大类:主观印象调查法和生理量测量法。

主观印象调查法是针对被试验者做问卷调查,听取他们对机器人的印象。为了使结果具有客观性和普遍性,必须严守心理实验所应该遵循的计划、实施、分析的有关规则。

举几个具有代表性的测量印象的手段。

① 自由回答法。这是让被试验者自由回答对机器人印象的方法。测量中不对被试验者的答案做任何提示,以便有利于发现机器人存在的问题。

该方法的缺点是被试验者有时不知道如何回答为好,同时还存在对反馈答案数据统计方面的困难。

② 限定回答法。这是直接让被试验者回答调查者期望获得的对特定印象的答案的方法。该方法的缺点是被试验者容易察觉调查实验的意图,结果答案被诱导。

至于评价印象的手段,分成相对排序法(提示多个试行结果,按照印象进行相对排序)和等级评价法(对各个试行结果按照印象强度评价)。实际上等级评价法也属于意义尺度法的范畴。

等级评价法能够了解到对印象的绝对值,不过难以测量对印象效果的微小差别。反之相对排序法对印象的分辨比较细微,缺点是难以获得印象的绝对值。

一般来说,摸索阶段的实验可以采用等级评价法,而确认阶段的实验则适合选择相

对排序法。

③ 意义尺度法(semantic differential method),属于一种以问卷形式调查对象印象的等级评价法。

意义尺度法中的提问内容都被重复提示,以便测量对于对象的整体印象。它的优点是不让被试验者察觉到测量的具体目的,其缺点是不适合针对特定印象开展详细调查。因为答案与提问事项的提示有关,难免带有若干诱导的成分。

生理量测量法,这是一种按照机器人发出提示的前、中、后期不同阶段测量与被试验者心理状态有关的生理量变化,以此评价机器人亲和性的方法。测量的生理量有脑电波、呼吸、心跳、出汗、肌电位、(血液、唾液、尿中的)荷尔蒙、瞳孔径等。其他有可能评测的广义生理量还有视线、接触、发声、身体动作等。

生理量测量法可以用来评价被试验者的压力或兴趣的程度,还可检查被试验者自身未曾感觉到的其他影响。

但是,生理量测量法并无法测量详细的心理状态。另外,在测量环境条件、即时性、选好性、测量成本等内容中实际上包含很多不适合实际试验测量的因素。

中田 亨

11.6.2 安全与协调作业意图的推断

1. 作业意图推断功能

“作业意图推断”是人与机器人共存系统(以下简称为共存系统)中保障安全和满足人与机器人协调作业的关键。

我们首先从保障的观点出发,用具体例子说明与人共存的机器人推断人的作业意图的功能具有何等重要性的。

为了让共存系统满足安全作业,应该一律将机器人上潜藏的对人有危害的结构去除。但是,即使手臂的外部被柔软的被覆层严严实实地遮盖,只要它的手部握住一把类似小刀一般的锐利机械,也可以被视作不安全。实际上这种情况并不少见。

不过,即使在这种情况下,只要人能够预先知道机器人不安全的误动作,危险就可以避免。考虑到很多机器人的误动作都是由人为错误造成的,所以让人和机器人持有互相

表达作业意图的功能,或者建立一种先推测对方意图,彼此意见一致后再采取共同行动的关系是很重要的。

图 11.20 给出共存系统危险分析所采用的 FTA 中导致危险的主要事项^[2]。

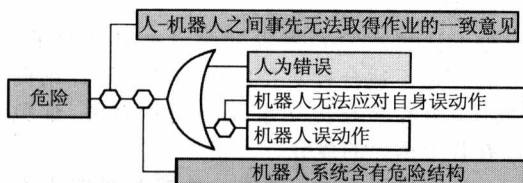


图 11.20 以人-机器人共存系统为对象的 FTA

这个 FTA 表明不仅机器人一侧的错误,人一侧的错误同样也是带来危险的原因(恰如 11.2 节~11.4 节所述)。记录的分析结果表明,机器人系统中哪里存在危险结构,那里就会成为引发危险的根源。但是,“机器人含有危险结构=危险性”是一种传统思想,是以人因“不小心”而被机器人袭击为前提的。图 11.20 建议人和机器人之间应该在作业前先确认双方意见是否达到一致,以避免引发危险。

2. 推断作业意图的方法

认识了作业意图推断功能的重要性之后,我们来跟踪一下推断方法的研究动向。人们在讨论推测意图的机制时,常常引用有关测心术(mindreading)的研究结果。Baron-Cohen 的研究^[3]从实验心理学的观点验证了人的心理功能在幼小时期就已经形成,而有助于推断对方心理层面的行为由 4 个层次构成:

① 从对方动作和方向中理解其行为意图。

② 从对方视线搜寻所关心的事项。

③ 表现对方、第三者、物体(三者)之间的关系。

④ 表现深层认识的心理状态。

这就揭示出建立人的心理模型的基础是信念(belief)和愿望(desire),它们以“知”和“情”为基础支撑“意图”(intention),或“意向”(intentionality)。其实更重要的是应该掌握对方的心理模型,这样就可以逆着对方心理信息处理流程一路上溯进行推断,即通过对方的行动揣测他的意图。有人接受了这个设

想,提出通过人行动初期的动作数据推断行为目的的技术,以及对人的作业建模,预先追踪作业状态的变迁,在获得当前实际作业后预测下一个状态的技术^[4,5]。

3. 感觉-行动系统的综合模型

如果从上述心理模型进一步概括感觉-行动系统综合信息处理的目的,可以认为有关大脑底核(basal ganglia)^[6]的研究(正在行动认知科学领域里受到极大关注)对机器人是十分有用的模型。为了解释大脑底核机制,人们正在大力开展眼球运动控制机构的研究^[7]。图 11.21 给出大脑底核信息处理的简单模型。图 11.21 首先从整体上阐明人类的行为(action)是靠人所感受(perception)的信息所决定的。

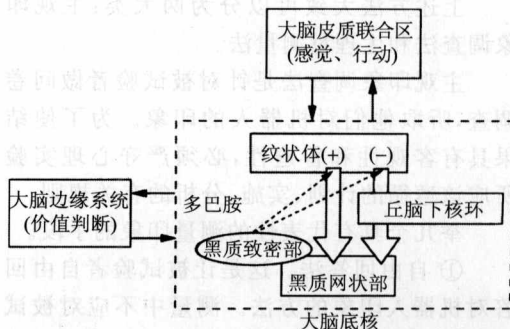


图 11.21 大脑底核的运行机理

图 11.21 还给出多巴胺信号的流程。在从各种感受信息到行为发生的整个行动决定过程中多巴胺扮演极为重要的角色,它随所给予的报酬改变发生的模式。图 11.21 中虚线包围的是大脑底核部分,其基本作用是根据大脑边缘系统的价值判断针对外部大脑皮质联合区发来的信息持续地使(随意)运动处于抑制状态。

另外,纹状体始终接收来自大脑皮质联合区的兴奋作用,借助于多巴胺神经(从黑质致密部向上传达物质)既可以进一步强化控制,也可减弱控制,释放运动(去抑制)。人们已经了解清楚表现随意运动的机制是前者靠多巴胺进一步活化纹状体-丘脑下核环-黑质致密部抑制系统中的发生点,不断阻止运动发生,后者则靠多巴胺抑制线条体-黑质网状部抑制系统中的线条体的发生点。

有人指出,有特别意义的是多巴胺造成

的去抑制和抑制强化机制与数学强化学习模型极为类似^[8],具体说是TD(Temporal Difference)学习机制,其特点表现为:对于外界刺激来说,如果实际得到的报酬比事先预测的大,多巴胺神经就被正活化,呈现积极获取刺激(促进去抑制)的欲望;反之,如果与预测的报酬相仿则没有变化;如果实际得到的报酬比预测的低,它就被负活化(抑制强化)。

有人在上述关于多巴胺信号知识的基础上,建立了Actor-Critic模型体系,证实多巴胺神经呈现出强化学习的信号处理机制^[9]。

有关心理模型结构的研究近年来有了新的进展。例如,出现用双脑起源学说,通过两者的相互作用解释心理功能形成的机制^[10]。可以预测,有关人/智能机械系统中安全性、协调性、亲和性的技术的进一步开发会更广泛地支持上述二元脑学说的理论。

山田阳滋

参考文献

11.1 系统可靠性的定义与度量

- [1] JIS Z 8115: 2000 デイペンダビリティ (信頼性) 用語
- [2] JIS C 5750-1, 2: 2000 デイペンダビリティ管理
- [3] 塩見弘, 関哲朗編著: やさしい信頼性データ解析, 日科技連 (1998)
- [4] 日本信頼性学会編: 信頼性ハンドブック, 日科技連 (1997)
- [5] 日科技連信頼性工学シリーズ: 1~5巻, 日科技連 (1998)

11.2 机器人的可靠性

- [1] 日本信頼性学会編: 信頼性ハンドブック, 日科技連 (1997)
- [2] 菅野文友ほか: ソフトウェアの生産技法, 日科技連 (1987)
- [3] 蓬原弘一: 国際安全規格における安全関連制御システムの考え方, ロボット, No.127, 日本ロボット工業会 (1999) pp.4-13

11.3 人为错误

- [1] J. Rasmussen: Information Processing and Human-Machine Interaction, An Approach to Cognitive Engineering, North-Holland (1986)
- [2] D. E. Embrey and J. Reason: Proc. ANS Int'l Topical Mtg on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems, Knoxville (1986) p.292
- [3] E. Hollnagel: Human Reliability Analysis: Context and Control, Academic Press, London (1993)
- [4] J. Reason: Human Error, Cambridge University Press (1990)
- [5] E. Hollnagel: Accident and Barriers, In J. M. Hoc, P. Millot, E. Hollnagel and P. C. Cacciabue (eds.),

Proc. Les Vallengiennes, 28, Presses Universitaires Vallengiennes (1999) pp.175-182

11.4 共存系统的安全性

- [1] 池田博康ほか: 人間と共存するロボットの本質安全化 国際安全規格に基づく危険源除去のプロセス, システム制御情報学会論文誌, Vol.13, No.12 (2000) pp.575-584
- [2] 森田寿郎ほか: 人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1 (1998) pp.102-109
- [3] 山田陽滋ほか: ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 日本機械学会論文集 (C), Vol.63, No.612 (1997) pp.2814-2819
- [4] 山田陽滋: ロボットの粘弾性被覆, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6 (1999) pp.770-773
- [5] Shrawan Kumar et al.: Symmetric and asymmetric two-handed pull-push strength of young adults, Human Factors, Vol.37, No.4 (1995) pp.854-865

11.5 基于共存系统的协调动作和行动

- [1] 永井清, 中西功: パワーアシスト機能を有する福祉ロボット・アシスト機器の機構と制御, システム/制御/情報, Vol.44, No.12 (2000) pp.688-695
- [2] 池浦良淳: ロボット-人間協調システムのモデリング, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3 (2000) pp.331-336
- [3] 小菅一弘: 仮想ツールダイナミクスに基づく人とロボットの協調作業, 計測と制御, Vol.34, No.4 (1995) pp.303-306
- [4] 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会 (1991)
- [5] D. T. McRuer, R. E. Magdaleno and G. P. Moore: A neuromuscular actuation system model, IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. MMS-9, No.3 (1968) pp.61-71
- [6] B. Bigland and O. C. J. Lippold: The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles, J. Physiol., Vol. 123 (1954) pp.214-224
- [7] 伊藤文夫: 筋感覚の科学, 名古屋大学出版会 (1985)
- [8] T. R. Nichols and J. C. Houk: Improvement in linearity and regulation of stiffness that results from actions of stretch reflex, J. Neurophysiol., Vol.39 (1976) pp.119-142
- [9] F. A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: Neural, mechanical and geometrical factors subserving arm posture in humans, The Journal of Neuroscience, Vol.5 (1985) pp.2732-2743
- [10] J. M. Dolan, M. B. Friedman and M. L. Nagurka: Dynamic and loaded impedance components in the maintenance of human arm posture, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 23 (1993) pp.698-709
- [11] 辻敏夫, 後藤和弘, 伊藤宏司, 長町三生: 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.3 (1994) pp.319-328
- [12] T. Tsuji, P. Morasso, K. Goto and K. Ito:

- Human hand impedance characteristics during maintained posture in multi-joint arm movements, *Biological Cybernetics*, Vol.72 (1995) pp.475-485
- [13] 辻敏夫, 森谷正三, 金子真, 伊藤宏司: 等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.2 (1996) pp.271-280
- [14] 五味裕章, 川人光男: 水平面における多関節運動中の手腕機械インピーダンスの計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.3 (1996) pp.369-378
- [15] T. Tsuji, K. Goto, M. Moritani, M. Kaneko and P. Morasso: Spatial Characteristics of Human Hand Impedance in Multi-Joint Arm Movements, *IEEE International Symposium on Intelligent Robots and Systems* (1994) pp.423-430
- [16] N. Hogan: The mechanics of multi-joint posture and movement control, *Biological Cybernetics*, Vol.53 (1985) pp.1-17
- [17] D. C. Clark, N. J. Deleys and C. W. Matheis: Exploratory Investigation of the Man Amplifier Concept, U. S. Air Force Report No.AMRL-TDR-62-89, AD-290070 (1962)
- [18] B. J. Makinson: Research and Development Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance, General Electric Company Report No.S-71-1056 (1971)
- [19] G. C. Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons Inc. (1996) pp.6-7
- [20] H. Kazerooni: The extender technology at the University of California, Berkeley, 計測と制御, Vol.34, No.4 (1995) pp.291-298
- [21] 小菅一弘: 仮想ツールダイナミクスに基づく人とロボットの協調作業, 計測と制御, Vol.34, No.4 (1995) pp.303-306
- [22] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono and Y. Umetani: Proposal of Skill-Assist: A System of Assisting Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks, *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics* (1999) pp.IV-11-IV-16
- [23] 藤本英雄, 佐野明人, 橋原昌洋: 難易度に対する人間の意図を反映したインピーダンス調整に基づく操作支援, システム制御情報学会論文誌, Vol.13, No.12 (2000) pp.552-559
- [24] N. Hogan: Controlling Impedance at the Man/Machine Interface, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1989) pp.1626-1631
- [25] 辻敏夫, 加藤荘志, 金子真: 人間-ロボット系の追従制御特性, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.285-291
- [26] 山田陽滋, 大東治宜, 酒井隆之, 梅谷陽二: 人間/ロボット共同搬送作業において作業者の意向を反映させるためのヒューマン・インタフェースの提案, 日本機械学会論文集 (C), Vol.67, No.656 (2001), pp.1069-1076
- [27] 藤本浩志: 多機能動力義足, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5 (1996) pp.632-635
- [28] 吉田正樹, 赤澤堅造: 筋電電動義手について, システム/制御/情報, Vol.41, No.11 (1997) pp.472-477
- [29] 増田正: 筋電図による筋肉の機能と構造の推定, バイオメカニズム学会誌, Vol.15, No.3 (1991) pp.132-141
- [30] 谷江和雄, 加藤一郎: バイオメカニクスと機能代行装置, 電子通信学会誌, Vol.66, No.11 (1983) pp.1169-1180
- [31] R. W. Mann: Human rehabilitation engineering, 計測と制御, Vol.21, No.6 (1982) pp.634-643
- [32] S. C. Jacobsen, D. F. Knutti, R. T. Johnson et al.: Development of the Utah artificial arm, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol.BME-29, No.4 (1982) pp.249-269
- [33] D. Graupe, J. Magnussen et al.: A microprocessor system for multifunctional control of upper limb prostheses via myoelectric signal identification, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.23, No.4 (1978) pp.538-544
- [34] 辻敏夫, 伊藤宏司, 長町三生: 義手制御を目的とした多チャンネルEMG動作識別法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J70-D, No.1 (1987) pp.207-215
- [35] R. J. Triolo and G. D. Moskowitz: The theoretical development of a multichannel time-series myo-processor for simultaneous limb function detection and muscle force estimation, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol.36, No.10 (1989) pp.1004-1017
- [36] 赤澤堅造, 林義昭: 筋電義手開発のための筋運動制御系の動特性推定, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J73-D-II, No.2 (1990) pp.257-265
- [37] M. F. Kelly, P. A. Parker and R. N. Scott: The application of neural networks to myoelectric signal analysis: A preliminary study, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol.37, No.3 (1990) pp.221-230
- [38] 辻敏夫, 森大一郎, 伊藤宏司: 統計的構造を組み込んだニューラルネットによるEMG動作識別法, 電気学会論文誌 (C), Vol.112, No.8 (1992) pp.465-473
- [39] 平岩明, 内田典佳, 下原勝憲, 曾根原登: 筋電操作ハンドの制御のための皮膚表面筋電信号のニューラルネットによる認識, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.2 (1994) pp.216-224
- [40] D. Nishikawa, W. Yu, H. Yokoi et al.: EMG Prosthetic Hand Controller Using Real-time Learning Method, *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics* (1999) pp.I-153-I-158
- [41] S. Morita, T. Kondo and K. Ito: Estimation of Forearm Movement from EMG Signal and Application to Prosthetic Hand Control, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2001) pp.3692-3697
- [42] 伊藤宏司, 辻敏夫: 筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用, 電気学会論文誌 (C), Vol.105, No.10 (1985) pp.201-209
- [43] C. J. Abul-Haj and N. Hogan: Functional assessment of control systems for cybernetic elbow prostheses — Part I: Description of the technique, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol.37, No.11 (1990) pp.1025-1036

- [44] 奥野竜平, 吉田正樹, 赤澤堅造: 筋電制御によるバイオミメティック電動義手の開発, 電気学会論文誌 (C), Vol.114, No.11 (1994) pp.1090-1094
- [45] 辻敏夫, 重吉宏樹, 福田修, 金子真: EMG 信号に基づく前腕動力義手のバイオミメティック制御, 日本機械学会論文集 (C), Vol.66, No.648 (2000) pp.2764-2771
- [46] 福田修, 辻敏夫, 金子真: EMG 信号を利用した手動制御型人間支援マニピュレータ, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3 (2000) pp.387-394
- [47] 小菅一弘: 仮想ツールダイナミクスに基づく人とロボットの協調作業, 計測と制御, Vol.34, No.4 (1995) pp.303-306
- [48] O. M. Al-Jarrah and Y. F. Zheng: Arm-Manipulator Coordination for Load Sharing using Variable Compliance Control, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (1997) pp.895-900
- [49] 池浦良淳: 人間とロボットの協調作業, システム/制御/情報, Vol.44, No.12 (2000) pp.682-687
- [50] 小菅一弘ほか: 人間協調型ロボットを用いた物体の協調持ち上げ動作, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会予稿集 CD ROM (1999) pp. 1 P 2-75-105 (1) - 1 P 2-75-105 (2)
- [51] 田窪ほか: 人とロボットによる長尺物の協調運搬 (仮想非ホロノミック拘束による水平面内の制御手法), 日本機械学会論文集 (C), Vol.66, No.684 (2000) pp.2677-2684
- [52] O. M. Al-Jarrah and Y. F. Zheng: Intelligent Compliant Motion Control, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, pp.2610-2615
- 11.6 共存システム親和性的表現**
- [1] 鹿取ほか: 心理学, 東京大学出版会 (1996)
- [2] Y. Yamada et al.: A Consideration toward Human/Robot Dependability Based on The Current Techniques on Securing Human Safety for Human/Robot Collaborative Conveyance Tasks, Proc. of 1st IARP/IEEE-RAS Joint Workshop, Seoul, V-II (2001)
- [3] S. Baron-Cohen, Chapter 4: Developing Mindreading: The Four Steps, Mindblindness, The MIT Press (1995)
- [4] 山田陽滋: 人間の行動意図を汲むロボットの技術, システム/制御/情報, Vol.44, No.12 (2000) pp. 696-701
- [5] 山田陽滋ほか: メンテナブルな人間/ロボット共存システムによるヒューマン・エラー・リカバリー, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.4 (2003) pp.420-426
- [6] James C. Houk et al. (eds.): Models of Information Processing in the Basal Ganglia, MIT Press (1998)
- [7] 彦坂興秀: 脳は運動をどのようにプログラムするか, (辻省次編著) 脳: 高次機能と分子機構からさぐる脳疾患, メジカルビュー社 (1997) pp.57-75
- [8] P. Read Montague et al.: A framework for mesencephalic dopamine systems based on predictive Hebbian learning. The Journal of Neuroscience, Vol.16, No.5 (1996) pp.1936-1947
- [9] Roland E. Suri et al.: Learning of sequential movements by neural network model with dopamine-like reinforcement signal, Exp. Brain Res., Vol.121 (1998) pp.350-354
- [10] M. Tomasello: Human Cognition, Harvard Univ. Press (2000)

第6篇 新一代机器人 基础技术

第 1 章 拟人机器人

1.1 拟人机器人的硬件

本章将解说拟人机器人的开发历程。本章所提到的拟人机器人是指其移动机构为两足步行型或轮式移动型,有两条臂,能至少获得视觉信息或听觉信息其中之一的类人型机器人。表 1.1 揭示了拟人机器人的开发历程。

表 1.1 拟人机器人的开发历程

年 代	两足步行型	轮 式
1973	WABOT-1(早稻田大学)	
1993	有头部但不能行走的两脚两臂机器人(东京大学)	
1996	WABIAN(早稻田大学)	
	P2(本田技研工业公司)	Hadaly-2
1997	P3(本田技研工业公司)	(早稻田大学),
1998	H5(东京大学)	WENDY
1999	HRP-1(HRP),验证用小型拟人机器人(HRP)	(早稻田大学),
2000	PINO(ERATO), Mk. 5(青山学院大学), H6(东京大学), ASIMO(本田技研), SDR-3X(SONY)	H4(东京大学)
2001	H7(东京大学), HRP-1S(HRP), HOAP-1(富士通)	
2002	HRP-2P(HRP), SDR-4X(SO-NY)	

最初开发的拟人机器人是由早稻田大学生物工学研究组于 1973 年研制成功的,取名为 WABOT-1(WASEDA Robot No. 1)^[1]。

WABOT-1(图 1.1)由足、手、视觉、声音应答四个系统组成,它所具有的功能包括通过人造嘴与人进行简单的日语对话,人造耳、眼作为远程接收装置识别对象、测定距离和方向,以两足步行方式(每步 45s 的静态步行)进行移动,带触觉,能用双手抓握、移动物体等。如果将这些功能与人相比,该机器人的机能大概相当于一岁左右的婴儿。

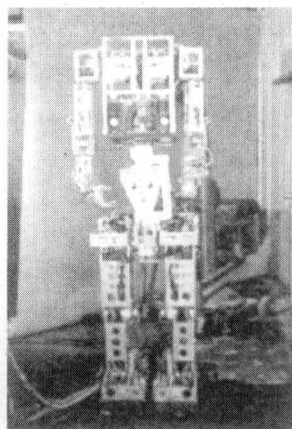


图 1.1 WABOT-1(早稻田大学)

为了判断能否握住目标、判断是否已经抓握或搜索目标,该机器人的两手均安装了微型开关作为触觉传感器。为了测量与目标之间的距离,其躯干安装了两台摄像头。

在腿部,双腿各包括足底关节处的横摇轴,踝关节处、膝关节处、髋关节处的俯仰轴,腰关节处的偏转轴等,共计 10 个自由度。在它的上身部分,有横摇轴 1 个自由度。在手臂部分,两臂各有肩部摆动、上臂旋转、肘部摆动、手腕旋转、手腕上下摆动共计 6 个自由度。另外,其手指部分五个手指为 1 个自由度。全部共计有 25 个自由度。结构材料主要使用了高强度的铝合金材料。

接下来再开发出来的拟人型机器人则是距 WABOT-1 开发 20 年后的事情了。它是由东京大学研究小组于 1993 年发表的小型拟人型机器人系列(有脑但不能行走的两足两臂机器人(远程大脑拟人机器人, RBHs))^[2~4]。此次研究开发的目的在于机器人的软件部分,因此将机器人的身体与控制软件的头部从物理层面上分开了。

该远程大脑研究^[5],首先试做了两台小型拟人机器人。其中,一台机器人的腿部部分两足各有俯仰轴的 3 个自由度,两足合计 6 个自由度。手臂部分也同样,两臂各有俯仰

轴的3个自由度,合计共6个自由度。这个具有12个自由度的机器人身高330mm,体重约为2kg。另一台机器人(图1.2)的腿部部分两足各有俯仰轴的3个自由度,足底的横摇轴为1个自由度,两足合计8个自由度。手臂部分则为两臂各有俯仰轴的3个自由度,肩部偏转轴为1个自由度,合计共8个自由度。这个具有16个自由度的机器人身高360mm,体重为2.3kg。

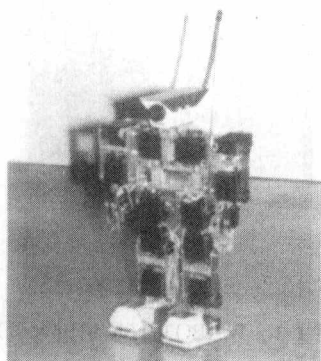


图 1.2 RBHs(东京大学)

这种拟人机器人的重心位置比较低,头部均安装有内置图像传输电路的黑白摄像头,在腿部和背部分别安装了驱动伺服与摄像头电源,而在各个关节处则采用了航模用的伺服模块。

按照类似的方式,又开发了各种各样功能的小型拟人机器人^[3]。虽然有关步行动作的研究是主要围绕静力学研究(基于重心)展开的,但仍然探讨了很多实现拟人机器人各种全身动作的先驱性的实验研究^[15,16],如带视觉的步行动作^[6]、搬运动作^[7]、基于视觉的摇摆动作^[8]、基于视觉的上腿部协调动作^[9]、视觉诱导型运动^[10]、拥抱动作^[11]、单腿站立时的全身平衡^[12]、调动全身的物体传接动作^[13]和借助于接触传感器的落座动作^[14]等。

另外,随着老龄社会的临近,对能辅助人类的机器人的需求增长很快。在这种情况下,1992年早稻田大学的研究小组启动了一项由政府、产业界、科研院所共同进行的计划项目“项目:拟人型”。1995年,该项目被NE-DO(新能源/产业技术综合开发机构)的1995年度最先端领域研究开发方案招标研究计划所采纳,由此而开发的拟人型机器人就是

Hadaly-2 和 WABIAN(WAseda Bipedal humanoid)^[17]。

Hadaly-2(图1.3)是轮式拟人型机器人。在集成基于视觉的环境识别和对话功能(语音识别/合成)、姿态动作等功能的基础上,它能与人进行直接交流,并具有一些对人友好的和安全的动作的物理交互功能。该机器人^[18]的高度为1.7m,躯干宽度约为40cm,整体长度约为130cm。

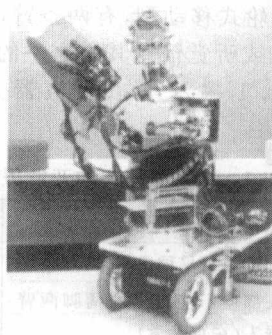


图 1.3 Hadaly-2(早稻田大学)

Hadaly-2 的自由度构成的详细情况如下。

1. 头部

具有能绕水平轴、上下轴转动的两个眼球,以及为跟踪深度方向的视觉目标所必需的4个自由度的颈部。这样对于移动目标,它就能实现不亚于人类的视觉跟踪动作。

2. 手指部分

四根手指共计有13个自由度,其中大拇指为4个自由度,其他三根手指各有3个自由度。各根手指的根部装有力觉反馈用的6自由度压力传感器。

3. 手臂部分

各有7个自由度。在各个关节处安装了能机械调整柔性的被动柔性调节机构(MIA)。该机构的作用是在机器人与人协同作业时调节操作力度,以确保人的安全。手臂部分各个关节的驱动装置为用于肩部的AC电机、用于手腕部的DC电机、用于柔性调节的DC电机、用于黏性调节的电磁制动器,而且每个关节都用了三个驱动器。手部的移

动速度则参考了成年男性的一般动作速度,设计为约 1.0m/s。

其移动机构为轮式。通过控制、驱动两个前轮,可以实现前、后以及原地转动。据发表的资料显示,其最大移动速度约为 6km/h。

躯干部具有偏转自由度,移动机构停止后,它的上身可以扭动。

1998 年,还开发出了更安全、更灵巧的机器人 WENDY^[19]。

WABIAN 更具人形,它与人等高,具有躯干自由度,两足能实现动态行走。该机器人跟人一样,能手持物体进行行走,由于当时的设计要求考虑了在家庭内使用的背景,因此它还具备情绪交互功能和通过 ISDN 的远程操作功能^[20,21]。该机器人直立静止状态的身高为 1660mm,总重量为 107kg,肩部可搬重量为 30kg(单肩为 15kg),手部重 1.5kg。它的头部安装有获取视觉和听觉信息的机构,除电源以外所有的控制装置都搭载在机器人身上(图 1.4)。

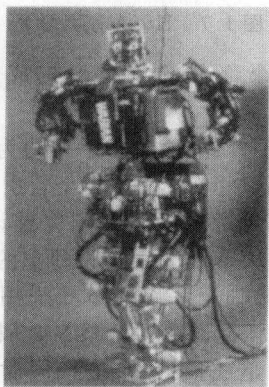


图 1.4 WABIAN(早稻田大学)

WABIAN 的自由度构成情况如下:眼球部与颈部各有横摇轴与俯仰轴 2 个自由度,手腕部与人一样各有 7 个自由度,手部部分各有 3 个自由度,躯干部有横摇轴、俯仰轴、偏转轴各 1 个自由度,腿部的足关节、膝关节以及髌关节各有俯仰轴的 1 个自由度,足底部有缓冲机构与被动自由度 4 个,合计为 43 个自由度。各个关节的驱动方式为:在髌关节处采用了在较大范围内可以改变关节刚性的非线性弹簧机构的差动驱动方式;其他关节处则采用了一个自由度配一个驱动器的直接驱动方式。腰部的构件材料为 YKK 公司

生产的高强度超微晶铝合金“GIGAS”,其他部分则采用了超硬铝材料。在控制系统方面,控制机器人的计算机安置在腰部后面,电机驱动电路安装在躯干上部,各个关节按 0.5~1ms 的周期实施控制。另外,在腿部关节处还安装了两套状态检测器,提高了安全性。该机器人还具有 Ethernet 通信功能,可以连接外部的信息处理装置等。WABIAN 机器人后来被不断地进行各种各样的模块化部件的开发以及控制装置的改进开发,并且还开展了全身运动的研究^[22]、与人在物理层面进行交互的研究^[23],以及生成全身运动模式的软件研究^[24]等具有开创性的研究工作。

另一条研究线索来自产业界的本田技研工业公司,它于 1996 年 12 月发布了 P2(图 1.5),在 1997 年 9 月以及 2000 年 11 月又分别发布了 P3(图 1.6 右侧)和 ASIMO^[25](图 1.6 左侧)。

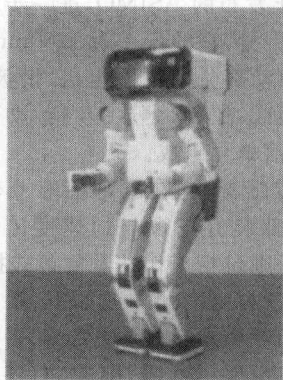


图 1.5 P2(本田技研工业公司)

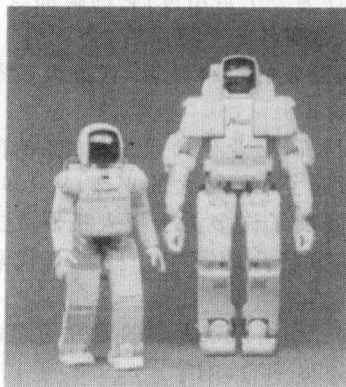


图 1.6 ASIMO 和 P3(本田技研工业公司)

P2 身高 1820mm,重量为 210kg,以无线化为目标,将计算机、电机驱动器、电池、无线

装置等所必需的器件都内藏于躯干部,由无线方式通过自动控制能实现自主步行、上下楼梯、推动小车等。P2 的亮相给许多机器人研究人员带来巨大的震撼。据发表的资料显示,P2 基于电池的动作时间大约能维持 15min。

P3 则改善了零部件的材料,并采用分散式控制,对其进行了小型化、轻量化改进,使它的尺度设计更接近人类生活的环境。

P3 身高 1600mm,重量为 130kg,其自由度构成如下:肩关节 3 个自由度、肘关节 1 个自由度、手腕关节 3 个自由度,因此左、右手臂各有 7 个自由度,共合计 14 个自由度;手部各有 1 个自由度,合计为 2 个自由度;腿部的髋关节 3 个自由度、膝关节 1 个自由度、脚腕关节 2 个自由度,即左、右各有 6 个自由度,共计 12 个自由度。据发表的资料显示,其最大步行速度为 2km/h。

2000 年发布的 ASIMO,进一步缩小了尺寸,减轻了重量,它的身高为 1200mm,重量为 43kg。其驱动部分由伺服电机、谐波减速器、驱动单元组成,控制部分由步行/动作控制单元、无线通信单元组成。

至于传感器,它在脚部装有 6 轴力传感器,在躯干部装有陀螺与加速度传感器。它的操作部分则包括工作站及便携式控制器。

ASIMO 自由度的构成如下:手臂部分的肩关节处为 3 个自由度,肘关节、手腕关节处各有 1 个自由度(旋转),即左、右各 5 个自由度,合计为 10 个自由度;手部左、右各 1 个自由度,合计为 2 个自由度;它的腿部与 P2、P3 一样,左、右腿各 6 个自由度,合计为 12 个自由度。据发表的资料显示,其最大步行速度为 1.6km/h。

本田技研工业公司研发的 P2 的问世及其性能激起了人们极大的兴趣,从 1998 年至今,人们开展了许多关于拟人机器人方面的研究。本节将介绍其中一些具有代表性的工作。

首先介绍由东京大学的研究小组研究的 H4^[26](1998 年)、H5^[27](1998 年)、H6^[28](2000 年)、H7^[29](2001 年)。此项目是得到了日本学术振兴会未来开拓推进事业“关于微机械电子与软机械电子综合集成的高级活体功能机械的研究(JSPS-RFTF96P00801)”

的资助。

H4 是作为一个研究平台而被开发的,其目的主要是为了研究实际环境中机器人与人共同工作时的安全问题,它的全身分布着不可缺少的触觉传感器,而且覆盖着柔软的皮肤。

H5(图 1.7)身高 1270mm,总重量 35kg,是一个具有 30 个可控自由度的两足拟人步行机器人。它的所有关节的驱动装置都是由带编码器的 DC 电机以及减速机构组成的。



图 1.7 H5(东京大学)

H5 各个部分的自由度构成情况如下所示:

H5 的手臂部分,每个手臂均为肩 3 个自由度、肘 2 个自由度、手腕 1 个自由度,合计 6 个自由度。为了减少手部的位罝误差,在靠近躯干部的关节处采用了无间隙的谐波减速器,在肘偏转轴至手部关节处采用了行星齿轮减速器。抓握部分由 3 根靠金属丝驱动的双关节手指组成,由一个电机同时控制 3 根手指的开合。

H5 腿部的每一条腿均包括髋关节 3 个自由度、膝关节 1 个自由度、踝关节 2 个自由度。所有的关节都是经过同步带(timing belt)将电机动力传递给谐波减速器的输入轴,而且谐波减速器的输出轴又与邻近的连杆直接相连,由此既能提高电机的安装自由度,还能确保具有无间隙性。脚底采用两块铝制平板夹住抗震纤维材料的结构设计。在抗震纤维材料与铝材相接触的部位,配置了压感式电阻元件(FSR: Force Sensing Resistor)。这样,就可以测量出作用于脚底的力分布及 ZMP(Zero Moment Point,零力矩点)。

其头部有两只眼,共计有 4 个自由度,能

分别驱动两个摄像头的直立轴,并同时控制两只眼的上下左右转动。

为了降低成本,其结构材料主要采用了铝板,在腹部则装入工业 PC 机和输入/输出板卡,以完成包括电机的软件伺服在内的整个机器人的控制。由于装载了无线 LAN 以及图像发射器,因此它与外部连接的缆线只有电源线。此外,利用无线 LAN,可以通过外部终端对它进行控制或动作监控。

1999 年,东京大学相继发表了 H5 机器人的动态步行研究报告^[30,31]、有关视觉联动型迈步动作的研究报告^[32]及有关上腿部协调型的起立动作的研究报告^[33]等。

为了开展在实际环境中全身配合的动作研究,后来又新开发了 H6。H6 是在 H5 的基础上,追加了自由度(颈部横摇轴、手部俯仰轴),提高了手臂的输出力量,增大了髋关节的可动范围。在此基础上,东京大学发表了该机器人有关环境识别的研究报告^[34]及有关步行目标轨迹的在线生成研究报告^[35]等。

H6 的身高为 1325mm,宽为 586mm,厚为 267mm,重量为 55kg。其自由度构成包括腿部各 6 个自由度、手臂各 7 个自由度,再加上各 1 个自由度的可开闭手部,头部 5 个自由度,共计 33 个自由度。H6 的电源为两个 12V、5A·h 的铅蓄电池,但它也可以借用外部电源。

H7(图 1.8)为 H6 的运动改良型模型。在借鉴 H6 经验的基础上,它改造了电机驱动器,并调整了自由度构成(废除了眼部的 3 个自由度和各个手腕部的横摇轴,追加了各脚尖的 1 个自由度)。其身高为 1468mm、宽 604mm、厚 255mm、重量为 58kg。

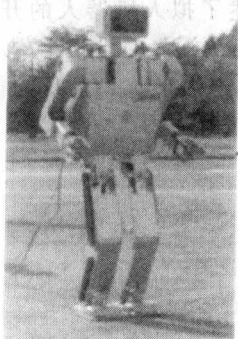


图 1.8 H7(东京大学)

H7 自由度的构成为:腿部各 7 个自由度、手臂各 6 个自由度,另外各有 1 个自由度可开闭的手部,头部 2 个自由度,共计 30 个自由度。将四个 12V、2A·h 的铅蓄电池串联作为电源(也可借用外部电源)。其研究结果包括在线步行动作生成的研究^[36]、利用三维视觉的抓取动作生成的研究^[37]等。

1998 年,日本经济产业省启动一项为期 5 年的关于“与人类协调·共存型机器人系统的研究开发”的国家计划项目(HRP: Humanoid Robotics Project)。

该项目(HRP)以“在人类的工作·生活环境中,能与人类协调·共存,进行复杂工作的拟人机器人系统的开发”为目的^[38]。项目委托给了 NEDO,由(财)制造科学技术中心(MSTC)作为管理法人,与独立行政法人产业技术综合研究所(以下简称产总研)一起共同进行研究^[39,40],作为成果,项目开发出了 HRP-1^[41](1999 年)、HRP-1 S^[42](2001 年)、HRP-2 P^[39](2002 年)及小型的验证用模型^[43](1999 年)。

HRP-1 拟人机器人的身高为 1600mm、宽为 600mm、最大厚度为 595mm、躯体重量为 99kg,电池重量为 17kg,躯体背面装载了带 6 个插槽的 VME 机箱。该机器人平台和软件均由本田技研工业公司开发。它的自由度构成包括手臂各 7 个自由度加 1 个自由度的开合式手部,腿部各 6 个自由度,共计 28 个自由度。

由于该机器人是以远程操作控制作业为前提进行设计的,因此其腿部由步行命令控制,而手臂和头部则受控于远程操作装置操作员的控制动作。

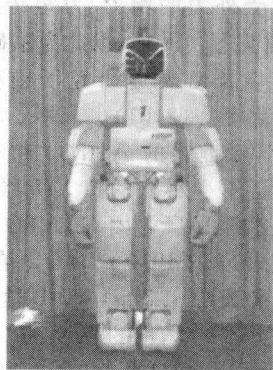


图 1.9 HRP-1 S(本田技研工业公司)

在 HRP-1 的基础上,由本田技研工业公司开发了 HRP-1 S 拟人机器人(图 1.9)的机器人平台,而它的软件由产总研开发。该机器人可以以 5ms 为周期独立、同时控制所有的关节,是能够完成更高难动作的机器人模型。

HRP-2 P(图 1.10)是产总研与川田工业公司、安川电机公司、清水建设公司共同开发的拟人机器人。其身高为 1540mm、宽为 600mm、最大厚度为 340mm、重量约为 60kg。其自由度构成头部 2 个自由度、腰部 2 个自由度、手臂各 6 个自由度加 1 个自由度的开合式手部部分、腿部各 6 个自由度,共计 30 个自由度。

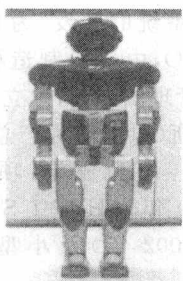


图 1.10 HRP-2 P

(川田工业公司、安川电机公司、清水建设公司、产总研)

HRP 虚拟平台验证用的硬件模型是身高 550mm、重量 7.7kg、两足各 6 个自由度、两臂各 7 个自由度,合计为 28 个自由度的小型拟人机器人。为了降低成本,该机器人的所有关节都尽可能采用同样的减速机构(谐波减速器)。通过电机与减速机构的输入轴之间的同步皮带传输系统,可以很容易地在 100~300 之间改变各个关节的减速比。

在它的上面装载的传感器有检测 ZMP 的脚底传感器、检测上身姿态的姿态传感器、检测手腕所受外力的腕力/力矩传感器及无线 CCD 摄像头等。另外,以此为基础,富士通 Automation 以及富士通研究所还生产出了 HOAP-1 产品^[44,45](2001)。

2000 年,除上述的 ASIMO 和 H6 之外,又相继发布了不少小型的拟人机器人。其中包括科学技术振兴事业团 ERATO 北野共生系统项目组开发的 PINO^[46](6 个自由度、身高 700mm、重量约 4.5kg)、青山学院大学开发的 Mk. 5^[47](22 个自由度、身高 356mm、重量约 1.9kg),以及来自企业的,如 SONY 公司开发的 SDR-3 X^[48,49]等(图 1.11,身高约

500mm、体重约 5kg、24 个自由度、步行速度约为 15m/min)。根据所发表的 SDR-3 X 技术资料,SDR-3 X 能按照 0.25s 一步的速度进行快速步行,具有包括起身动作等的多种步行/地面运动动作,能由三台机器人协作完成三种舞蹈表演,能进行交互式的各种动作表演(例如,通过语音指示来识别颜色球,并接近它,然后识别球门,将球踢进去)。



图 1.11 SDR-3 X(SONY)

接着,2000 年 11 月,在日本的 PACIFIC 横滨展示大厅举办了世界上首次个人机器人展览会“ROBODEX2000”。

2002 年,SONY 公司又发布了运动性能更好、交流能力更强的 SDR-4 X^[50,51](图 1.12,身高 580mm、体重 6.5kg、自由度 38 个、步行速度约为 20m/min)。根据所发表的技术资料,SDR-4 X 能完成各种动作(包括路面上的步行,在地板、榻榻米、绒毯混合路面上的步行,利用超小型立体视觉的自主回避障碍物的步行动作,适应外力的动作,摔倒时的对应动作,摔倒后的起身动作等),进行交互式表演(人脸的检测、识别、学习、连续语音识别、未知语句获取、短期记忆、长期记忆、对话行动控制、带感情的声音合成等),还能用四台机器人实现无伴奏合唱表演(四台机器人独立生成四声部歌声,进行发声并同步生成运动),由四台机器人边改变队形边进行快节奏舞蹈表演等。

上面概述了拟人机器人的开发历程,期待今后能进行更深入的研究开发。



图 1.12 SDR-4 X (SONY)

1.2 拟人机器人的运动控制与动作规划

1.2.1 步行模式生成器、反馈控制

有关拟人机器人的运动控制的先驱性研究,在学术界主要是以早稻田大学^[1,2]、东京大学^[3~5]、产业技术综合研究所^[6,7]为中心开展的,其研究成果以及细节内容都已经公开。另外,在企业界,主要以本田技研工业公司^[8~10]和 SONY^[11~13]为中心开展该项研究,其成果虽然已经公之于众,但其细节却未公开。

因此,本节主要以早稻田大学、东京大学、产业技术综合研究所为中心,概述已经被确认为有效的、采用 ZMP 的拟人机器人步行模式生成方法以及基于此方法的反馈控制。

该方法的大概内容如下:首先,预先设定通过由任意的足部轨迹形成的支撑多边形内侧的 ZMP 轨迹;接着,生成能实现所设定的 ZMP 轨迹的全身运动模式;然后,以生成的运动模式为基础构建反馈控制系统,以此实现拟人机器人的步行。下面,按照 ZMP 规范(ZMP criterion),ZMP 方程式的导出、步行模式的生成、反馈控制的顺序来进行解说。

1. ZMP 规范

如果考虑机器人与路面之间相互作用的力和力矩,根据达朗贝尔(D'Alembert)原理,机器人在重力以及惯性力所产生的力和力矩作用于路面的同时,路面对机器人也同样产生平衡的反作用力和反作用力矩(以下称为地面反作用力,地面反作用力矩)。

所谓稳定的步行是指脚移动时机器人不会摔倒,也就是机器人能保持支撑状态。摔倒也算是一种旋转运动,因此机器人摔倒(不再保持支撑状态)可以认为是该机器人以通过脚部与路面的接触点(假设是3点以上)所形成的支撑多边形的某条边或某个点在路面上的直线为轴产生转动,并且产生了绕该轴的(从支撑多边形来看)向外的力矩。

反过来说,为了维持支撑状态,机器人对所有的边都不能产生向外的力矩,只能产生向内的力矩。由于机器人的支撑点不能悬空,对于所有的支撑点而言,机器人作用于路面的重力或惯性力所产生的力都是压向路面

的,那么可以知道这些力的合力对路面的作用点(假设为P)必须是在支撑多边形的内部(图1.13)。

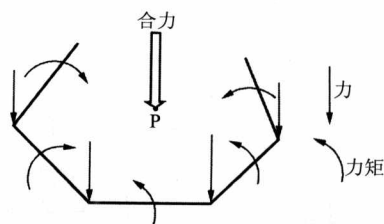


图 1.13 保持支撑状态

在点P处,很明显,由合力所产生的力矩为零。这些力矩为零的点被称为ZMP。

绕点P的力矩假设为向量T,将T投影到水平面内的直交的两个轴上,各个分量均为0。两个轴若用X、Y来表示的话,可以得到下面的表达式:

$$T_x = 0 \quad (1.1)$$

$$T_y = 0 \quad (1.2)$$

ZMP是由M. Vukobratović(米奥米尔·乌克布拉托维奇)首先提出的一个参数^[14]。通过此参数,在1点、2点以及多点(3点或以上)的三种状态中,适用于从步行开始到步行结束的完全动态步行的最稳定的支撑状态就是多点支撑→多点支撑→……→多点支撑这样的序列^[15]。

这里,在将多点支撑的支撑点用直线连接所组成的多边形中,面积最大的凸多边形被称为支撑多边形。

在步行的任何瞬间,如果ZMP存在于支撑多边形的内侧,并且机器人有作用于路面的作用力的话,机器人就能够步行稳定而不会摔倒。这就是ZMP规范。这个支撑多边形也被称为稳定区域。

如果两足步行机器人是单脚支撑,那么很明显,稳定区域就是支撑脚的底,而其ZMP就在此脚底内。若是双脚支撑,稳定区域就在两脚底构成的支撑多边形内,而ZMP就必须在该区域内(图1.14)。

另外,由于地面反作用力与机器人作用到路面上的力平衡,因此可以知道,地面反作用力的合力作用于路面上的点(地面反作用力点)与机器人作用于路面上的合力作用于路面上的点相同。也就是说,参数ZMP与在

生物力学领域的步行解析中称之为地面反作用力点的参数是一致的。

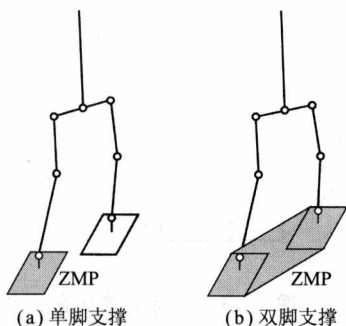


图 1.14 稳定区域

2. ZMP 方程式的导出

在 ZMP 方程式的导出过程中,为了简化拟人机器人与路面相互关系的处理,在这里做了如下的假定,并设定了如下的坐标系^[1,16]:

- ① 机器人是由质点组成的(多质点系)。
- ② 路面十分坚硬,无论作用了多大的力或力矩,地面都不会变形或移动。
- ③ 设坐标系为直角坐标系 $O-XYZ$ (右手规则),其中由 X 轴(与机器人的正面方向一致)和 Y 轴构成的平面与路面一致,与路面垂直的轴为 Z 轴。
- ④ 机器人的脚底与路面的接触状态为着地点的集合。
- ⑤ 在着地点(绕 X 轴、 Y 轴以及 Z 轴)旋转的摩擦系数十分小,可以忽略。
- ⑥ 机器人步行时的推力被限制在其着地点的两个方向(X 轴以及 Y 轴)上不产生滑动的范围之内。

但是,关于①的模型化,在机器人进行模型化时,为了更加严密起见,一般将机器人作为刚体系而不是质点系。但在实际设计两足步行机器人的硬件时,需要最大限度地减轻重量,因此必须使用力矩-重量比大的驱动器以及轻量结构材料。其结果是,机器人的大部分质量都集中在驱动器和电池上,因此将机器人作为质点系进行建模和分析,基本上也都能得到实用的精度。

基于上面的假设,在世界坐标系 $O-XYZ$ 中求解 ZMP 的公式(ZMP 方程式)的推导过程如下所示。

首先,设定如图 1.15 所示的各个向量,则可以得到关于路面上的任意点 P 的力矩平衡式如下:

$$\sum_i m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{p}) \times \left(\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + \mathbf{G} \right) + \mathbf{T} = 0 \quad (1.3)$$

式中, m_i 为第 i 个质点的质量; $\mathbf{r}_i = [r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}]^T$ 为第 i 个质点的位置向量; $\mathbf{p} = [p_x, p_y, 0]^T$ 为点 P 的位置向量; $\mathbf{G} = [g_x, g_y, g_z]^T$ 为重力加速度向量; $\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$ 为点 P 的地面反作用力力矩。

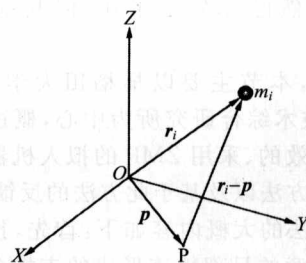


图 1.15 向量的设定

如果按各个分量来表示,那么式(1.3)可以等价

$$T_x = -\sum_i m_i [(r_{iy} - p_y)(\ddot{r}_{iz} + g_z) - r_{iz}(\ddot{r}_{iy} + g_y)] \quad (1.4)$$

$$T_y = -\sum_i m_i [(r_{ix} - p_x)(\ddot{r}_{iz} + g_z) - r_{iz}(\ddot{r}_{ix} + g_x)] \quad (1.5)$$

$$T_z = -\sum_i m_i [(r_{ix} - p_x)(\ddot{r}_{iy} + g_y) - r_{iy}(\ddot{r}_{ix} + g_x)] \quad (1.6)$$

此时,若 $T_x = 0, T_y = 0$,则根据上一节的定义,点 P 就成为 ZMP。即 ZMP 方程式可以表示如下:

$$\begin{aligned} p_x &= u_x \\ &= \frac{\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z) r_{ix} - \sum_i m_i (\ddot{r}_{ix} + g_x) r_{iz}}{\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z)} \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} p_y &= u_y \\ &= \frac{\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z) r_{iy} - \sum_i m_i (\ddot{r}_{iy} + g_y) r_{iz}}{\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z)} \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中, $\mathbf{u} = [u_x, u_y, 0]^T$ 为 ZMP 的位置向量。

从式(1.7)和式(1.8)可以看出,机器人的 ZMP 是指机器人各个质点的重力以及惯

性力作用于路面上所产生的力矩总和为零的点。

下面求作用于地面上的地面反作用力。假设点 P 的地面反作用力为 F_r , 则

$$\sum_i m_i \left(\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} + \mathbf{G} \right) + \mathbf{F}_r = 0 \quad (1.9)$$

按照各个分量来表示的话, 式(1.9)可以表示为

$$F_{rx} = -\sum_i m_i (\ddot{r}_{ix} + g_x) \quad (1.10)$$

$$F_{ry} = -\sum_i m_i (\ddot{r}_{iy} + g_y) \quad (1.11)$$

$$F_{rz} = -\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z) \quad (1.12)$$

因此, 为了保证机器人与地面相接触, 必须满足以下条件:

$$F_{rz} > 0 \quad (1.13)$$

也就是说, 必须有

$$\sum_i m_i (\ddot{r}_{iz} + g_z) < 0 \quad (1.14)$$

但一般来说, Z 轴方向的加速度很小, 即

$$|\ddot{r}_{iz}| \ll |g_z|, \quad g_z < 0 \quad (1.15)$$

因此, 条件式(1.13)能够得到满足。

从假定条件④中可知, 若支撑机器人的着地点为三个以上, 而且 ZMP 位于着地点所形成的支撑多边形(稳定区域)内, 那么在满足假定条件⑥的条件下, 机器人能够进行稳定步行, 既不会绕 Z 轴转动, 其着地点也不会悬空。

另外, 如果

$$\ddot{r}_{ix} = 0, \quad \ddot{r}_{iy} = 0, \quad \ddot{r}_{iz} = 0 \quad (1.16)$$

那么从式(1.7)和式(1.8)可以得到

$$u_x = \frac{\sum_i m_i r_{ix}}{\sum_i m_i} = c_x \quad (1.17)$$

$$u_y = \frac{\sum_i m_i r_{iy}}{\sum_i m_i} = c_y \quad (1.18)$$

式中, $[c_x, c_y, c_z]^T$ 为机器人的重心位置向量。

从式(1.17)和式(1.18)中可以看出, 静态步行时, ZMP 为机器人的重心在路面上的垂直投影。因此, ZMP 规范与我们平常用来判定步行稳定的基准, 即重心相一致, 并且它是比仅考虑惯性力更严密的基准。

3. 步行模式的生成

以转动关节相连接组成的拟人机器人, 其 ZMP 方程式为具有耦合的非线性二阶微分方程。因此, 通过解析方法来求解满足所

导出的 ZMP 方程式的步行模式十分困难。

一般的做法是在将机器人模型进行近似处理的同时, 对机器人的运动进行约束。然后, 通过线性/解耦处理, 将 ZMP 方程式降阶到用解析方法或数值方法容易求解的程度, 就可以实时生成实用的满足 ZMP 精度的步行模式^[5]。另外, 通过在 ZMP 方程式中添加外力项, 也可以使其具有对外力的适应能力^[2,17]。

4. 反馈控制

即使用按上述方法生成的全身运动模式来程序控制机器人, 由于实际环境很难严格满足导出 ZMP 方程式时的前提条件, 因而控制方法的鲁棒性不高。因此, 一般都采用如下的方法^[2,6,13], 如综合集成世界坐标系中的各个分量的目标轨迹、设定 ZMP、设定地面反作用力 F_r 的闭环适应控制方式、实时全身运动模式生成方式, 以及利用硬件组成的实际 ZMP 和实际地面反作用力稳定机构等, 以提高步行本身抗干扰的鲁棒性, 提高全身运动模式姿态的稳定性等^[2,6,13]。

山口仁一

1.2.2 运动规划与全身运动

拟人机器人不仅仅具有多自由度和复杂几何形状, 而且其动力学也很复杂, 因此规划机器人动作的运动规划也是一个很难处理的对象。人们都希望拟人机器人能像人类一样能全身敏捷地运动, 因此能根据环境采取适当动作的运动规划功能就必不可少。下面, 首先介绍拟人机器人在没有几何约束条件下的运动规划方法, 其次介绍考虑力学影响的全身运动规划方法, 最后介绍满足几何、力学约束的运动规划方法。

1. 满足几何约束条件的运动规划

拟人机器人在双足站立的静止稳定状态(或者再加上一只手臂放在桌上的状态)慢慢移动自由手臂等的场合, 其力学影响基本上都可以认为在可忽略范围之内。在这样的应用场合几何运动规划方法很有效。

一般来说, 几何运动规划方法是指根据环境信息规划机器人动作的问题。在很多情况下, 此类问题定义为在环境已知条件下, 给出初始状态和结束状态, 求解连接起始状态

与结束状态的,与障碍物及机器人本身都无碰撞的轨迹问题。目前,针对此类问题已经提出了各种各样的算法。这个问题又分为在相同环境下只搜索一次连接初始状态和结束状态的轨迹的 single query 问题和在相同环境下多次搜索的 multiple query 问题。后者又可以分为前处理和 query 处理,由此减少处理 query 的工作量。

在人工智能及计算几何学领域中,进行了不少关于求解几何环境信息(特别是二维或三维)中搜索连接起点位置和终点位置的路径问题的各种最优解算法方面的研究。其中,最有名的古典算法有 Dijkstra 或 A^* 搜索等计算量为 $O(n)$ 的算法。但是人们发现,这些求最优解的方法随着空间维数的增加,计算量也增大,会出现所谓的 NP-困难问题(多项式计算花费过多的时间,其结果是算法可能无法执行)。

如第5篇5.4.4节中所述,从多个自由度的角度出发,机器人的运动规划是被当作在维数 $C(\text{configuration})$ -Space 的关节角空间中进行搜索的问题而求解的^[19]。在拟人机器人中,空间维数一般能达到好几十个,如果从这种空间维数的几何形状去搜索路径,求解最优解的计算成本将会非常高,实际上也不太有效。因此,很多人认为求解最优解,不如采用随机化方法等,即那些尽量均匀地进行空间搜索,能尽快找到一个可行解的方法。其中最著名的就是利用 A^* 算法的概率路径图法^[3]。

针对机器人的形状模型或环境几何干涉问题,有人提出了一种快速搜索多边形之间的干涉的算法^[21]。该算法是基于按层次的、定向的包括数据表示法 OBB(Oriented Bounding Boxes,有向包围盒)来实现的。其中,特别是关于凸多面体交叉的快速算法^[22]为大家所熟知。根据这些算法,能检查出数万量级的多边形所组成的物体之间的干涉。但是这些算法都是为了能快速找出干涉情况而设计的,涉及物体的添加或删除等前处理的计算量比较大,因此在现阶段要处理变形物体仍然非常困难。

在这些随机化手法中,计算速度最快的方法要数 RRT(Rapidly exploring Random Tree,快速探索随机树法)搜索树法^[23]。该方

法是在 C-Space 内随机选取采样点,然后从离当前搜索树最近的节点出发,朝着所选定的采样点的方向前进一段距离,再构建一个新节点。该方法的特点是不需要前处理,而且被称为魔数(Magic Number)的参数个数较少,Voronoi 区域越大越容易搜索,还能均匀地覆盖整个非凸区域。

图 1.16 给出在二维空间中 RRT 搜索树的成长例。利用此 RRT 搜索树,基于从环境中获取的三维视觉信息以及机器人的形状模型,在拟人机器人双脚站立条件下进行了不与周围环境接触,抓持装有液体的饮料瓶,或者将手臂伸到箱中的研究^[24]。由于从视觉上能获取环境的几何信息,因此几何运动规划方法很有效。

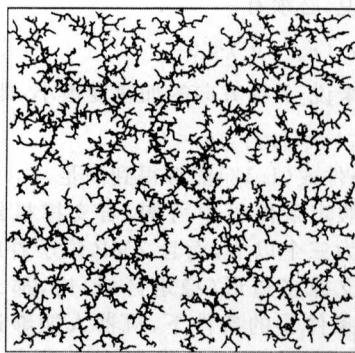


图 1.16 二维空间中 RRT 搜索树的成长例

上述任务均可以不考虑机器人的力学问题,在全身缓慢动作的条件下,该方法处理静力学平衡十分有效。例如,已提出的基于静力学平衡及机器人几何形状的算法^[25],能生成机器人从倒卧状态到起立状态的动作。即首先,通过凸法将机器人转换成凸多面体,确定其目前与地面接触的面。然后,在 C-Space 中生成微小运动,再根据它与地面接触的面和重心的关系,计算出它与地面接触的面的迁移量。在这个算法中,一边循环计算这个过程,一边搜索起立的动作系列。结果能够生成以任意状态横卧在地面上的拟人机器人的起立动作。只要是缓慢动作系列,这个算法都能在任意环境中搜索到任意姿态之间的迁移。从这个观点来看,该算法的通用性很广。

关于在静力学上稳定的两足步行的平面避障规划的脚步着地场所问题研究,有人^[26]提出在预先计算出到达目的地的连续路径之

后,将根据静力学稳定的姿态序列生成包含脚着地点在内的轨迹问题作为最优化问题,通过序列二次规划法(SQP: Sequential Quadratic Programming)加以解决。不过,由于只能在脚的着地平面上检测二维几何干涉信息,所以本方法仅可以用于二维半环境的步行避障。

2. 满足力学约束条件的运动规划

为了补偿全身动作过程中动力学的影响,保持平衡状态,更多的处理途径不是借助于前文所述的类似几何算法的空间表达,而是根据任务所提出的运动方程的约束条件加以描述,进而加以解决。

单脚站立时,为了能让拟人机器人尽量满足给定的全身关节角轨迹,保持其平衡,有人提出了一种输入修正方法^[27],其特点是用非线性2次规划法保证ZMP的足底力矩的平衡和重心的位置。这时的ZMP是由自身运动产生的惯性力按照逆动力学求出的,计算量为 $O(n^3)$ 。其效率虽然不太好,但是该方法已经被证实针对30个自由度左右的拟人机器人能达到实时应用。由于该方法没有前面所说的处理几何干涉的框架,因此补充了脚不能收拢的启发式约束条件。该方法还有个特点,即通过控制补偿平衡的关节权重,可以生成如单臂平衡而非全身平衡的解。

图1.17为单脚站立时,另一只脚执行踢球动作的轨迹示意图。图1.17的最上面为输入轨迹,中间为使全身获得平衡的情形,下面为髋关节处俯仰关节权重被加倍时的情形。由结果可以看出,后者通过躯干补偿了甩脚的影响,并通过手臂补偿了绕偏转轴的力矩。

3. 满足几何/力学约束条件的运动规划

拟人机器人既能保持平衡,同时又能避免对环境的几何干涉的问题有许多应用实

例,但是由于描述问题很困难,计算量又非常庞大,结果导致问题解决起来十分困难。

有人在考虑动力学的“问题空间”中,通过几何运动规划的搜索方法作为kino-dynamics问题进行了研究。

在拟人机器人动力学稳定而几何学无干涉的运动规划研究中,有人提出了一种方法^[28]。该方法认为静力学上稳定的姿态空间属于C-Space,先按RRT搜索树法搜索此C-Space,在得到静力学上稳定且几何学上无干涉的轨迹后,将此轨迹变换为动力学稳定的轨迹,并检查在几何学上是否有干涉,若有干涉,则应该重新搜索C-Space。

相反,在如何将几何干涉引入运动方程描述的研究方面,有人提出了在环境与机器人的连接部分设置虚拟构件,描述其影响^[29]的建议。

另外,还提出了一种根据任务不同将拟人机器人的关节进行分组,并对各组分别求出各自的平衡补偿和避免几何干涉的末端轨迹^[29]。这样做的结果,比如,在通过腿部来进行平衡,通过手臂来实施驱动器的位置控制的场合,可以收到减少计算量的效果。

4. 总结

本节描述了在实际环境和几何及力学约束条件下,为了规划拟人机器人动作的机器人运动规划功能,为了让拟人机器人能够执行避开障碍物、保持平衡、将手指伸到指定位置等任务,实时解决各种约束条件的运动规划功能十分重要。

为此还存在其他一些问题,例如,传感器获取实际环境信息的精度,以及视觉只能检测摄像头前方的信息,以至于信息不完整等。尽管在现实中十分需要这样的能够解决传感器面临的实际问题的运动规划方法,但目前

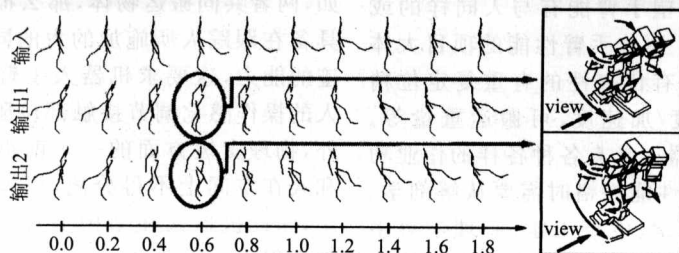


图1.17 自动平衡器的计算结果

几乎没有开展对这方面的研究。

最后值得指出的是,其实机器人以外的其他领域,尤其是动漫领域,并非像机器人那样必须满足各种严格的约束条件,因而它们的计算量少,而且算法生成的动作十分自然。拟人机器人具有与人类相仿的自由度,自然也应该尽量避免不自然的动作,因此研究模仿人类动作或手法的方法论十分重要。

加贺美 聪 J. J. Kuffner

1.3 仿人作业

1.3.1 仿人手臂和手

1. 仿人手臂

本节将生活在人类空间中,以代替人类,或者与人类协同作业为主要目的的仿人形(anthropo-morphic)机器人概括为拟人机器人。为此,如果打算用单台机器人模仿人所具有的多种功能,就要求其仿人手臂(包括手臂和手)充分考虑人的形态和结构。从这个观点来看,仿人手臂与假肢(prosthesis)之间的区别不很明显。但是一般来说,从设计的功能或外观还是可以对其加以区分的。仿人手臂与工业机械手的显著区别有下面几点:它通过非语言媒介,即形态的特征或运动向人发送信息;它的表面覆盖有表皮,其上配置了各种类人的感觉传感器;能操作人类所需要的各种工具等。基于这些特点,下面就最新的仿人手臂、手的功能和结构加以解说。至于正文所涉及的解剖学词汇,请根据需要参见附录。

2. 手臂的整体功能

整个手臂的功能包括:按照操作员的动作或意图与环境进行物理的或信息层面的传递和交互作用,与人直接接触的接口,与腿部协调以保持全身平衡等。从代替人来进行作业的观点来看,希望手臂能有与人同样的或更强的运动能力。评价手臂性能的项目大体与机械手一样,具有代表性的有重复定位精度、最大动作速度/加速度、可搬运重量等。由于要求拟人机器人具有各种各样的作业功能,从而在决定其性能规格时需要从解剖学、康复工学、人体工学、生产工学、心理学等多个方面进行充分讨论。人类是通过全身协调来完成作业的,其手臂与躯干、手与手臂等密

不可分。但是为了方便,本书将手臂功能分解成基于手臂的全局运动和基于手的局部运动。具体说来,手臂负责将手的位置和姿态移动到更易于作业的状态,而手则负责调整与被抓握目标的相对位置及姿态。

3. 手臂功能

为了能让手臂实现自然的运动和作业,合理的途径就是分析人的动作。不过,作业功能除了受手臂自身关节可活动范围及最大随意肌力的影响外,还受躯干及腿部对作业姿态调节的影响。图 1.18 中给出了人在厨房中的作业姿态与工作台面、收藏柜之间的关系^[1]。根据人体工学的理论,人在平面作业中能够到达的最大范围随姿态的变化而不同,大抵可以分为一般作业范围和最大作业范围。最大作业范围也就是手能触摸的范围,靠躯干的帮助(身体往前屈伸等)可以扩展这个范围。改变双眼的死角对作业姿态的调整也是有利的。



图 1.18 生活空间中作业姿态的改变

关于机器人与人在相互作用的物理表现方面,主要存在的问题是作业时人与拟人机器人之间的内部力量的调整方法问题。例如,两者共同搬运物体,那么拟人机器人必须具备在跟踪人所施加的力的同时生成作业轨迹的能力,这要求机器人手臂具有能够按照人的操作感觉调节接触部位阻抗的能力。另外,物理支援方面的一个前提条件是机器人和人在空间上不得分离,以及确保人身的安全,因此机器人在结构上具有保护人的能力就变得十分重要。

在信息的相互作用方面,机器人起到了

非语言交流(nonverbal communication)消息源的作用。非语言的信息传递方式称为 nonverbal 语言^[2]。按照 nonverbal 语言的时间性质,可以将其分为在交流过程中发送方不能改变消息和随着时间的变化可以变化消息两种。具体到与手臂密切相关 nonverbal 语言中,前者反映身体特征(容貌、体格等),后者表示身体运动(通过身体的动作或姿态直接体现的信息)。在身体运动中包含各种各样的功能,图 1.19 中给出了一部分,诸如标志(emblem)、说明(illustrator)、适应(adaptor)。



图 1.19 作为身体媒介的手臂运动

4. 手臂的形态与结构

根据解剖学,拟人机器人手臂的形态与结构基本上是关节形(articulated robot)的,特别是垂直多关节形,而人体最难模拟的地方是肩关节和手关节(手腕关节)的自由度。

图 1.20 给出了肩关节处的外转动作模型^[3]。图 1.20(a)表示解剖学上的基本肢位,图 1.20(b)表示在外转动作过程中的状态。解剖学上的基本肢位是指正立且手掌面向前方的状态。在肩部的外转过程中,在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 附近仅有肩胛与肩关节的运动,其后肩胛骨和锁骨顺次开始绕轴旋转。即手臂关节、肩胛骨、肩峰、锁骨形成复合结构后,各个要素通过联动实现肩关节的运动。另外,在手势中常见的“耸肩”动作则是由肩关节相对于胸廓作下压与上挺而实现的。



图 1.20 肩关节复合体的运动

图 1.21 表示功能解剖学对前臂旋转运动解释的示意图。在图 1.21(a)的旋后位中,桡骨与尺骨基本上是位于同一个平面上的平行位置。在图 1.21(b)的旋前位中,如果将尺骨视为形成前臂的固定中心轴线,那么桡骨如同缠绕尺骨一样形成交叉运动。实际上,尺骨并未固定,相对于旋转运动,手关节的旋转中心能够移动。若再考虑肌肉群或运动神经,那么前臂的旋前、旋后不仅与手关节的掌背屈肌和桡尺屈肌连动,而且还受关节被动阻力的影响,形成更加复杂的干涉运动。

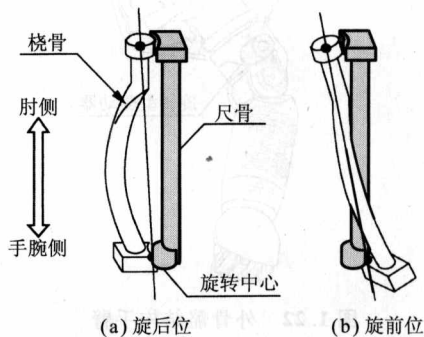


图 1.21 前臂的旋转运动

由机械严格再现这些复杂的运动是不现实的。因此,拟人机器人手臂的肩关节和手关节大多采用正交 3 自由度近似。例如,机器人肩关节以肩峰点为中心的一个球面为其最大工作范围。从功能方面来看,这种近似对完成作业是不成问题的,而且从简化坐标变换运算和避免奇异位姿来看也是有效的。

5. 手臂构成举例

根据驱动器和构件的位置关系,可以将手臂的结构大体分为外骨骼型和内骨骼型。图 1.22 和图 1.23 分别列举出了外骨骼型和内骨骼型两种结构。外骨骼型利用驱动器或减速器作关节,外侧配置外壳,将构件串接而成。它的驱动器往往采用旋转型电机,也有的关节被设计成被动阻力形式来近似肌肉的黏弹性机构。外骨骼结构的设计跟一般机械手的设计相同,因此很多拟人机器人都采用这种设计。

外骨骼结构并没有正确反映上述解剖学的原理。如果采用更像人体结构的设计,那就是内骨骼结构。内骨骼结构是在构件与关节的外侧安装直线形驱动器或金属丝的方

法。解剖学上的肌肉、腱、骨骼连接部分分别对应于直线驱动器或球面关节(spherical joint)等。液压缸、气压缸、橡胶人造肌肉、弹簧和金属丝做成的腱均可以用作驱动器。关于球面关节可以有好几种结构^[4]。图 1.24 就是其中的一种,它具有正交的 3 个轴^[5]。由于集成了 3 个独立的驱动器和 2 个万向联轴节,该机构能实现绕俯仰轴和偏转轴 180°、横摇轴 360°的大范围转动。



图 1.22 外骨骼结构手臂

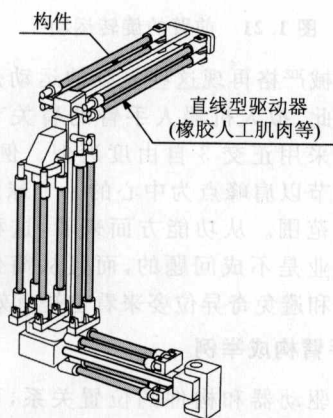


图 1.23 内骨骼结构手臂

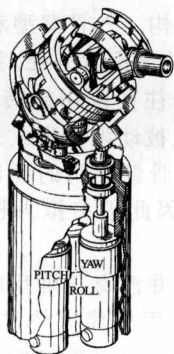


图 1.24 采用球面关节的手关节

表皮的存在会对手臂的功能产生影响。这是因为表皮承担着通过身体特征发布信息,与周围环境产生物理的和信息的相互作用的接口功能。表皮覆盖层多半采用与手臂分离的设计,以便实现这些功能。图 1.25 给出了在外骨骼结构的手臂上安装内置力觉传感器和触觉传感器的缓冲覆盖层的例子^[6]。设计覆盖层要注意几点:从外表看不到与关节运动在结构上的干涉现象,在材料的选择方面要顾及到周围环境及接触状况,以及传感器的配置、金属丝/绳的选用等。

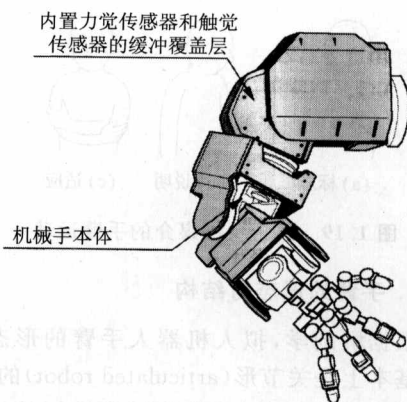


图 1.25 装有表皮覆盖层的手臂

除了上述事项之外,拟人机器人手臂还受到重量及消耗能量等方面的限制。因为手臂的前提条件是被装载在躯干或腿部上面,如果有必要,实际上也允许省略一部分功能。

6. 手的功能、形态与结构

让手具有对周围环境进行物理的、信息的操作和相互作用的能力,与人交流的能力等,手的主要功能是抓握、身体媒介、触觉感应,它可以对周围环境进行物理的、信息的操作和相互作用,并能够与人交流。跟手臂相比,手的主要特点是,它不仅与功能之间有密切的关联性,而且各个功能甚至是由复杂的子任务组成。即拟人机器人的手必须具备能同时且高水准地实现这些功能的综合性能。拟人机器人的手的设计方法之所以与工业机器人末端器(随作业的不同加以更换)的设计方法不同,正是源于此。

拟人机器人的自由度很多,因此让手指的姿态随着抓握对象物的不同而进行调节历来都是一件困难的事情。为了解决这个问

题,有一种方法是建议先观察人的动作,提取动作的类型,并与力学模型进行组合,然后生成抓握运动。根据解剖学理论,抓握功能还可以分为:静态抓握(保持物体的功能)、动态抓握(操作物体的功能)、重力抓握(充当支持台的功能),各自还可以进一步细分^[7]。例如,静态抓握包括手指抓握(digital grip)、手掌抓握(palmar grip)、对称抓握(centralised grip)。另外还有其他不同的分类方法,例如,将抓握动作分为手指与拇指的掌侧面以及手掌抓住物体的动作、拇指指尖和其他指指尖夹住物体的特殊动作。在区分抓握特性时通常可以参考人的肌肉力量,但是一般都按照手指施加的力(抓握力、勾引力、推压力、弹力等)来划分和测量夹持力^[8],而且它们都与夹持的姿态有关。

手在发挥身体媒介功能时,它主要是靠手势或手语等来体现。该功能与运动的自然性密切相关,因此在很大程度上依赖于形态和结构。这一项功能与人手的解剖学知识有关,仅从手的机构学的观点出发,相关的内容就有拇指的对指运动、手指关节(MP 关节、PIP 关节、DIP 关节)的连动、MP 关节中的 2 轴(弯曲伸展与内收外展)的正交等。至于触觉感应功能,则必须考虑的问题不仅有感觉接收器的特性,还有与皮肤、与骨骼、与运动的关系等。例如,人用指尖夹持物体,只有当相对的指尖稳定并正确地感受到受压的影响时,感觉接收器才能正确发挥作用^[3]。因此,应该充分注意防止皮肤(弹性组织)受损或变形,以及第三节指骨和指尖的坚固组织在传感性能方面起到的不可忽视的作用。有人还在进行关于滑觉和质感检测的研究,据研究报告说^[9],它们与指纹、皮肤等的形态和结构有密切的关系。

7. 手的构成例^[10]

拟人机器人的手从功能方面来说受形态的制约很多,而且必须安装在手臂的前端,因此对其体积和重量也有严格的限制。手的构成方法可以按照手指数与配置方法、指关节的自由度配置和驱动方法(腱驱动和减速机驱动这类间接驱动方式居多)、传感器的种类与配置方法等进行分类。图 1.26~图 1.28 是几类具有代表性的手机构^[11~13]。

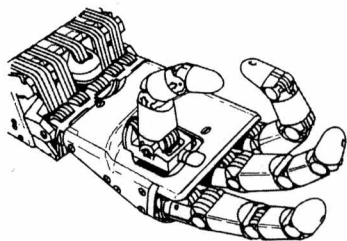


图 1.26 腱驱动型 4 指手

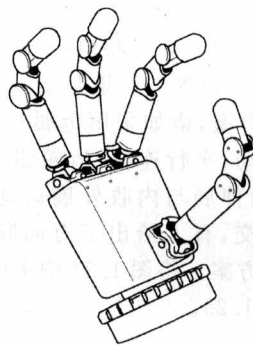


图 1.27 减速器驱动型 4 指手

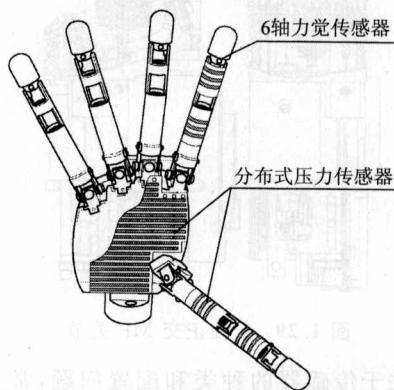


图 1.28 带力觉和触觉的 5 指手

手指数受到手部体积的限制。如果注重手指的抓握功能,那么倾向于将无名指和小指当作一个辅助器官,整个手就由 4 根手指构成。这样设计的原因主要是基于大部分抓握实际上都是由拇指、食指和中指来完成的经验。不过,在诸如手语或乐器演奏等需要手指的独立运动的作业中,就必须用 5 根手指。在这种情况下,就必须选择或省略一部分功能,或者将整个手做大。在手指的配置方面,拇指的配置往往存在很大差异。例如,如果将拇指设置在对立位上,这样做虽然对动态或静态抓握有利,但重力抓握或手势等功能就将受到限制。

关于手指关节的自由度,可以按照数量和配置两个方面进行分类。在解剖学上,人的手由5根指、每指4个自由度、合计20个自由度组成。为了独立控制所有这些关节,在手部的内部或附近位置必须保证有安装驱动器的空间。但是在形态约束下实现起来有些困难,解决的办法是考虑手指关节实际的牵连性与他动伸展功能,将部分关节设计成被动关节(图1.25中手的DIP关节和PIP关节),或者通过腱驱动等将驱动器设置在手部的外部(图1.26)等。如果是后一种方式,那就有很多个方案,诸如采用金属丝与滑轮、链传动与带传动、平行连杆、齿轮组等。在MP关节中,弯曲伸展与内收外展运动的2个自由度必须正交,有人给出了万向联轴节或锥齿轮的机构方案。将图1.27中手的MP关节放大得到图1.29。

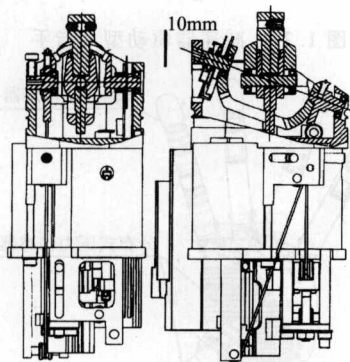


图 1.29 2轴正交 MP 关节

关于传感器的种类和配置问题,常见的是在指尖部位配置6轴力传感器。也有报告称,最近进行了应力分布和滑动等触觉的传感研究。图1.28的例子所给出的5指手中除指尖的力觉传感器外,还在手部和手指中部添加了分布式压力传感器。

森田寿郎

1.3.2 仿人远程操作

在机器人的远程操作中,一般要求具有逼真的临场感和高效的指令功能。但是拟人机器人远程操作的特点主要体现在多自由度上。

为了最大限度地利用拟人机器人,不论是手臂,还是脚、躯干等,必须对机器人全身实施有机的控制。问题是如何指挥超多自由

度动作,以及如何才能正确掌握拟人机器人诸多的状态量。

1. 指令系统

在给机器人前端位置和姿态的条件下,目前还不能将脚、躯干、手臂作为一个整体生成各个关节的指令值。因此,在现阶段有两种下达指令的方式:一种是向几个部分分别下达指令;另一种是向各个关节直接下达指令。

在前一种方式中,只需要将移动及操作所需的位置/姿态、路径、速度等输入脚与手臂即可,这时的操作和显示系统可以沿用与传统机器人完全相同的系统构成。图1.30给出了一个例子^[14]。指令是通过键盘、操纵杆、三维鼠标等输入的。

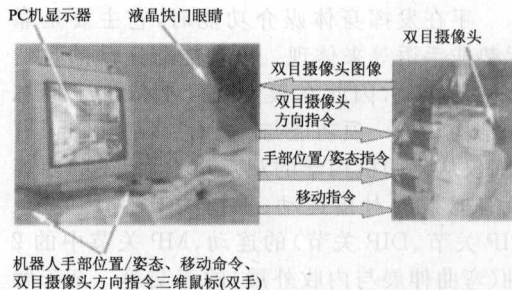


图 1.30 传统的操作系统

在很多场合都借助于运动获取器来下达全身姿态指令^[15]。通过光学、电磁、语音等手段读取操作者各个部位的三维位置,也可以将操作者的姿态原封不动地转换成机器人指令。尽管这种指令方式的实时性好,效率高,但是其精度不高。如果拟人机器人的关节构形与人相差悬殊,那么这种方法就很可能无法生成期望的动作。再有,就是这种方式一般很难做到力反馈,因此除了姿态指令之外与机器人之间很难实现其他的信息交换。

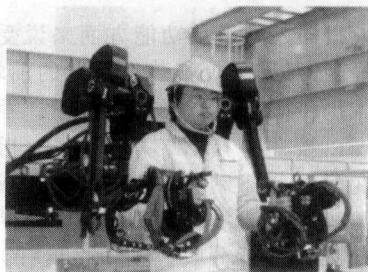


图 1.31 相似型主手臂实例(川崎重工业)

为了实现手臂及手部的精确动作指令,需要使用双向型主手臂。主手臂的形态或自由度根据相应的拟人机器人的结构或用途的不同而各不相同。图 1.31 给出了一个 7 自由度、与操作人员手臂姿态相似的主手臂,操作人员以“穿戴”的方式进行操作。图 1.32 则给出一种小巧的 6 自由度型主手臂,并没有一定要求它与从手臂相似。主手臂怎么选,应该从系统所要求的功能、性能、其他空间约束条件等各个方面进行综合考虑。

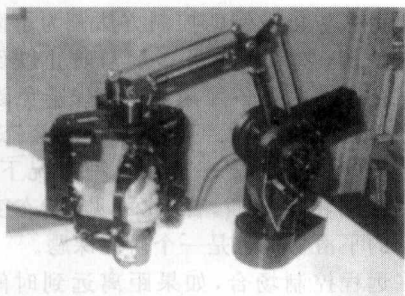


图 1.32 小巧型主手臂实例(川崎重工业)

如果拟人机器人采用多指手,那么操作器将会变得更加复杂。图 1.33 的操作人员穿戴着一副手套状的指令器,它由指关节角度传感器和反作用力提示机构^[14]组成。双向型的多指手主手臂结构相当复杂,它的轻量化和小型化面临着诸多困难。

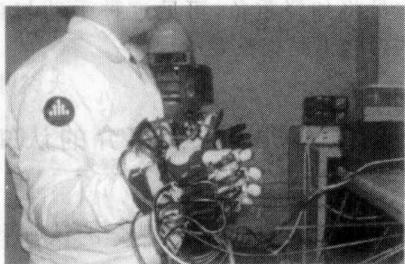


图 1.33 多指手主手臂实例(川崎重工业)

不论是步行移动还是脚摆好姿势后对某物体进行操作,拟人机器人脚部的操作都需要适当的指令系统。执行前一种任务,只需给定有关步行的信息(方向、距离、速度等),而不需要每次都维持脚的姿态。具体来说,除了图 1.30 中所示的键盘、操纵杆、3D 鼠标以外,还有通过语音下达指令的方式。另外,若要跨越障碍物、踢物体等,那么就必须指示脚的姿态,即需要一个主脚。人们通常不将

主脚作为脚的直接指令器,图 1.34 中给出一个利用光纤传感器构成主脚(单向)的例子。传感器的一端固定在操作人员的脚部,用来检测他的位置和姿态。该方式的缺点是指令精度不高,而且就像后面将要叙述的那样,为了防止机器人摔倒,主脚指令可能与实际拟人机器人的脚的位置和姿态有很大区别。

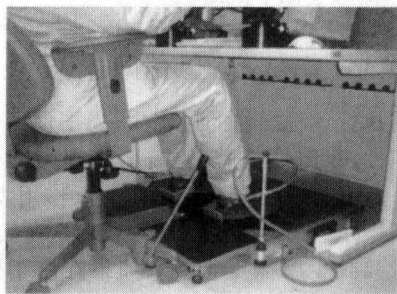


图 1.34 主脚的实例(川崎重工业)

2. 显示系统

远程控制一般不在绝对坐标系中实施位置控制,而是采用相对位置控制或力控制作业。可见,视觉、力觉、触觉等的反馈对于进行正确、高效的作业来说很有必要。

就视觉而言,大体分为佩戴 HMD(Head Mounted Display, 头盔显示器)方式和固定屏幕投影方式。图 1.35 给出 HMD 的例子^[14]。这种方式的临场感逼真,通过检测操作人员的头部的姿态,使拟人机器人的视觉摄像头与之发生联动,可以获得较宽的视野。其存在的问题主要是从 HMD 看不到操作人员的手,因此很难实现主手臂以外的其他操作。图 1.30 表示一个典型的固定屏幕的例子。显示画面比较小,即使采用立体图像方式,其临场感也有限。图 1.36 改成将多个屏幕组合起来的大画面立体图像显示方式,其结果是临场感相当逼真^[15]。



图 1.35 佩戴 HMD 的例子(川崎重工业)

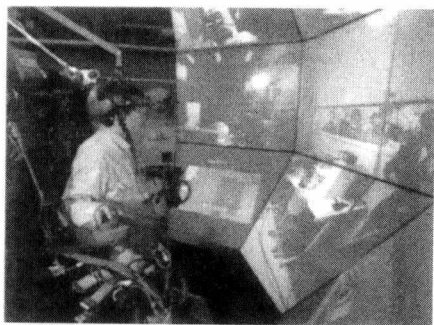


图 1.36 屏幕大画面显示例(川崎重工业)

在执行远程操作的过程中,为了保证作业的正确性,双向性很有必要,但是提高操作感并非一定需要生成与实际同样的反作用力,重要的是操作感觉要自然,要想做到这一点,重力补偿和减少摩擦很重要。如果在主手臂的动作范围内存在奇异点或处于奇异点的邻域,那么动作就可能无法执行,甚至会出现异常,因此在设计时需要特别小心。值得提及的是,在主手臂的工作区域内,如果在设计时尽可能让操作部分的等价惯性椭圆体接近球形,那么给操作者造成的差异感就会减小^[16]。

在步行及作业过程中,拟人机器人承受着来自路面或作业对象的各种反作用力。作业状况的不同还会引起躯干的姿态变化。将这些感受反馈给操作者不仅能提高临场感的逼真度,而且由于在步行过程中将视线的晃动与躯干的摇动一致起来,还能收到克服“醉步”现象的效果。图 1.37 给出这样的例子^[14]。图 1.37 中,操作者坐在装置上,感受变换后的 3 轴直线运动的动作效果,获得拟人机器人加速度和位移的实际体感提示。

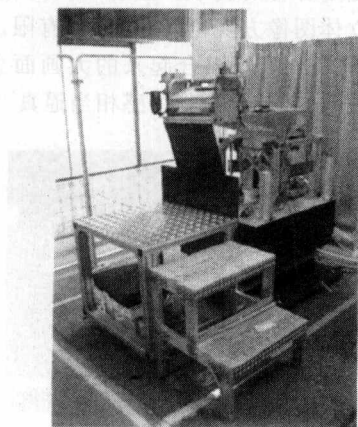


图 1.37 体感提示装置(川崎重工业)

已经有不少方法涉及触觉反馈,与多指手的情况一样,指尖机械式反馈方式在构造上使主手臂变得既沉重又复杂。为了避免这种问题的发生,一种有效的手段是将触觉信号转换为视觉或音频信号。提及触觉还存在另外一个研究课题,就是触觉还做不到高密度表达,因此在表达驱动器的轻量化、小型化和高通量方面还必须下工夫。

3. 控制系统

拟人机器人采取两足步行的形式,通常有必要引入防止跌倒的控制方法。为了防止机器人跌倒,如果操作员指示与防止跌倒的命令发生矛盾,就必须采取措施,避免误操作。今后,拟人机器人不仅选取站立姿态,也会选取坐位或横卧姿态。在这种情况下,防止跌倒控制将被切断。由此可见,姿态变更时控制的平滑切换也是一个研究课题。

在远程控制场合,如果距离远到时间的滞后不能忽略,那么就可能会带来响应性能变差或控制系统变得不稳定等问题。这时,有必要采取提高拟人机器人自主性的措施^[17]。

对操作员来说,在远程操作中始终准确地操作主手臂或手,确实是一种很重的负担。以搬运装满液体的杯子为例,如果拟人机器人能自动完成维持杯子水平状态的控制,那么操作员将如释重负,可见这种手动与自动控制的融合也是很重要的课题。

大筑康生

1.4 以拟人机器人为媒介的认知科学研究

1.4.1 以拟人机器人为媒介的认知科学研究的意义

近年来,与拟人机器人相关的技术的进步,使一些原来并不以机器人为研究对象的学者开始涉足拟人机器人的研究。特别是因为拟人机器人有着与人同样的身体,并被要求参与人类社会活动,所以将拟人机器人作为交流媒介探索人类认知系统的方法日益重要。

以拟人机器人为媒介的认知科学研究的意义可以从社会要求和科学贡献两个观点来说明。第一个观点是社会要求。在人类社会

中,拟人机器人在与人协作作业的过程中最能发挥自身的能力。之所以会这样是因为拟人机器人具有和人们同样的身体形状及动作机构,能有效地利用现在的环境(建筑物、阶梯,机械、机器的操作接口等),并自然地参与到人类社会中。甚至还可以设想把拟人机器人接入到互联网,将其作为社会信息的基础,向人们提供信息等。不过迄今为止,拟人机器人无法顺利地与人们进行交流,而这是参与人类社会的前提条件。为了解决这个问题,既需要提升语音识别及图像识别等单元技术,也需要从认知科学的角度探讨人类与拟人机器人的相互作用。

第二个观点是科学贡献,即拟人机器人作为媒介在认知科学研究中的意义。从计算论和构成论的角度研究人类认知机理的认知科学一向主要是借助于计算机仿真来验证模型的。可是,解释人类的认知机理,必须明确其与环境的相互作用及其与身体的关联。传统的认知科学对这些问题并没有可资验证的手段。特别是在人们相互交流的场合,由于参数过多,连制定有效的实验计划都相当困难。面对这样的问题,如果将拟人机器人当作媒介,就能够在交流实验中进行参数控制,甚至还能在真实世界中检验所提出的认知模型。通过这样的认知研究所获得的成果,反过来还能反馈给机器人学中为拟人机器人的设计与制作提供参考。

1.4.2 研究实例介绍

下面介绍几个以拟人机器人为媒介开展认知科学研究的实例。首先介绍一个以发育心理学知识为背景的研究,即 MIT(AI 实验室)的机器人 Kismet^[1,2]。Kismet 是基于发育心理学中关于母子之间相互作用的研究成果而开发出来的,该机器人由脸部和头部组成。通过语音识别和语音合成、图像识别和表情/视线的表现,Kismet 能与人进行交流。特别值得一提的是,它的脸部有多达 15 个自由度,能表现各种各样的感情,使它的社会交互作用发挥到前所未有的水平。但正如 Kismet 的研究人员所指出的那样,除了脸部、头部外,它身体的其他部位在人们交流中也起着重要的作用,而在 Kismet 的研究中尚未包括这一点。为了改正这个缺点,同样在该校的

AI 实验室里又制作了一台称为 Cog 的只有上半身的拟人机器人。这台机器人有手臂、头部及躯体,其用于感觉运动系统及视觉系统等研究^[3]。尽管 Cog 的研究取得了一定的成果,但同时也揭示出用机器人实现人类认知机理的难度。

还有一台与 Kismet 同样基于发育心理学或“心的理论”^[4]而开发的机器人 Infanoid^[5]。研发 Infanoid 的出发点是机器人要参与人类社会活动就必须具备预测和控制他人行动的能力,它应该实现“心的理论”,即能够访问他人的心理状态,并能建立发育过程的模型。Infanoid 的硬件相当于 3 岁左右孩子的上半身大小,除手之外它还有 23 个自由度。为了使它能与人相互注视,特别将它的眼球做成与人相近的样子。

还有一些研究,它们所关注的是交流过程中视觉或听觉的功能。SIG^[6]是一个为了用拟人机器人实现鲁棒认知机理而开发的机器人。SIG 的上半身类似人类,但没有手,用于研究视觉和听觉的处理机构的实现方式。特别值得一提的是,这个机器人能够将机器人自身的主动动作与视觉和听觉等传感器信息加以综合,以至于在与人类进行交流时能成功地区分两个说话人的声源,甚至能检测出声源的移动。同样,小林等^[12]以交流过程中的视线为重点,开发了能注视对方对话的语音对话机器人。横山等^[11]则关注人们对话时非语言信息对双方听说交替的影响,并通过机器人实验揭示了视线控制能使说话交替进行得更加顺利。

为了进一步开展认知科学的研究,具有综合信息交流功能的机器人显得十分必要。一个例子就是 ATR 智能机器人研究所开发的 Robovie。Robovie 是一个仅有上半身的拟人机器人,它能以更自然的形状参与人类的社会活动^[7]。这款机器人的特点主要体现在信息交流中,它的上半身的表现能力很强,即使是在开展认知研究时,它在与人的信息交流研究中也发挥着巨大的作用。例如,小野^[8]揭示了在路径引导的交流中,通过人与拟人机器人的手势同步,能顺利地传递空间信息。这个结果说明,手势等身体的互引作用是信息传递的基础。渡边等^[13]也指出信息交流中身体诱导的重要性,并开发出 InterRo-

bot。显然,如果不借助于拟人机器人的媒介作用,以上研究是无法开展的。

在 Robovie 的研究中,研究人员还从旁观的角度考察了两台拟人机器人通过自然语言及手势进行交流的效果^[9]。研究发现,机器人拥有以语言和手势与其他机器人进行交流的能力。研究结果表明,人们已经能够开始顺畅地与该机器人进行信息交流了。也就是说,外貌酷似人类的拟人机器人如果具有与人同样的信息交流功能所伴有的行为举止,那么人们就会将它们视为社会的合理存在,从而达到自然交流的境界。同样,不依仗拟人机器人,这项研究也是无法开展的。

从上述人与机器人信息交流的研究中可以知道,今后必须继续揭示拟人机器人获得真正意义上的社会性的条件、功能和机理等。Ono^[10]指出实现具有社会性的机器人的必备条件。这些条件就是:人们应该将机器人从传统的主仆关系(master-slave)中解放出来,将其视为同僚(peer),在这层意义上人类与机器人之间才能实现双向信息交流,而机器人的拟人化和多功能化是必要的。为了构建满足上述条件的机器人,必须建立与传统机器人观不同的概念。对于这种融入社会日常生活的机器人来说,在设计上充分考虑与人长期生活的能力和自然渗入人类社会的能力是十分必要的。在这个研究方向上,人们还在研究能与高龄者进行对话的机器人^[14]。这种机器人的各种条件和功能也必须借助于以机器人为媒介的认知科学,并一步一步地加以验证。

1.4.3 用于认知科学研究的拟人机器人所必须具备的硬件与软件

正如在研究事例中介绍的那样,随着研究目的的不同,认知科学研究用的机器人的软、硬件结构也不同。其大致可以分为注重视觉(视线)、听觉(语音)等个别功能的硬件结构,如 Kismet、SIG、Infanoid 等,以及注重综合功能的硬件结构,如 Robovie 等。在软件结构上,也分为以设计学习、情感等个别功能为重点的自上而下的结构方式,以及逐步添加机器人所需行为的自下而上的结构方式。本节以 Robovie 为例^[7],就认知科学研究中必要的硬件与软件进行说明。Robovie 的特点是

在硬件结构上注重综合功能,在软件结构上采用自下而上的方式。

Robovie 是依据日常生活中生动活泼的形象而创意的,能与人们交往的机器人。在设计时,特别要注意它的尺寸,如图 1.38 所示,身高既不应该让儿童感到恐怖(约 1200mm),又能与人在同样的环境中进行自由活动(半径 600mm 以内)。

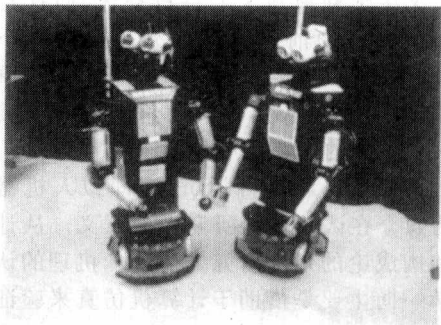


图 1.38 Robovie(ATR 智能机器人研究所)

在 Robovie 身上装备了多个相当于人的感觉器官的外部传感器和通过手势与人进行对话所需的关节自由度。外部传感器包括彩色摄像头(相当于人的视觉)、话筒(相当于听觉)、压力传感器(相当于皮肤触觉)等。作为机器人独有的传感设备,还另外加装了 360°视野的全方位摄像头,以及不接触即可检测对方距离的超声波传感器。这些人类感觉功能都是传统视觉传感技术无法做到的。例如,人们是始终对周围的环境状态保持一定程度的认识的,如果在机器人上仍然沿用传统摄像头,就很难实现这一功能。反之,如果选用全方位摄像头,这个功能就能轻而易举地得以实现。再有,人们很容易发觉是否有人靠近,但普通摄像头做不到这一点。如果它与超声波传感器一起使用,将距离信息和视觉信息进行融合,就能比较可靠地检测出人来。据说人有 90%的信息都是通过视觉获得的,因此人们才期待对方注视自己。由此可知,为了能够与人交往,对机器人的视觉功能做一定程度的充实是顺理成章的。

Robovie 的可动关节配置与人的上半身类似,具有模仿人类动作所需的最少自由度。具体地讲,眼球运动有 2 个自由度、头部动作有 3 个自由度、两条手臂分别有 4 个自由度,而且在安装它的肩部连接部位时有意让其关

节略向前突出。如前所述,这个研究确认,机器人在与人进行对话时,模仿人的行动,边说话边注视对方的眼睛,同时晃动身体并打出手势这些动作都很有意义。

如上所述,有两种方式的软件结构,即以诸如学习、情感等个别功能为重点进行软件设计的自上而下的结构方式和逐步添加机器人行为动作的自下而上的结构方式。Robovie采用后者来组织软件结构的框架。实际上,它里面装有100个行为和决定行为执行顺序关系的700条规则。每个行为都是根据认知科学的知识设计的,在与他人进行对话的过程中能伴随产生至关重要的眼睛和手的动作。例如,用手指指示墙报这个行为,机器人能先看着人的脸部,然后将视线转向墙报,用手指指示墙报,以达到与人共同注目的效果。至于自上而下的设计方法和自下而上的设计方法,究竟哪种方法更有效,目前还没有定论,但可以期待这两种方法最终将会融为一体。

石黑 浩 小野哲雄

参考文献

1.1 拟人机器人的硬件

- [1] 加藤:2足歩行ロボット(WABOT-1)の開発,バイオメカニズム2,東京大学出版会(1973) pp.173-174
- [2] 稲葉,金広,井上:脳を持ち歩かない2足2腕ロボットの開発,第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1993) pp.623-624
- [3] 稲葉,井上:東京大学JSKによるヒューマノイド研究,第4回JSMEロボメカ・シンポジウム講演論文集, No.98-70(1999) pp.38-43
- [4] 井上,加賀美:ロボットの知能とシステム統合:ヒューマノイドを例にとって,日本ロボット学会誌 Vol.20, No.5(2002) pp.464-469
- [5] 稲葉:リモートブレインアプローチによるヒューマノイド研究,第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1994) pp.305-306
- [6] 金広,加賀美,稲葉,井上:脳を持ち歩かない二足二腕型ロボットにおける視覚を用いた歩行動作の研究,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'94(1994) pp.197-202
- [7] 金広,加賀美,稲葉,井上:物を持ち運べる二足二腕ロボットの研究,第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1994) pp.419-420
- [8] 稲葉,長阪,金広,加賀美,井上:二足二腕ロボットによるプランク動作,第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1994) pp.351-352
- [9] 稲葉,五十嵐,二宮,加賀美,井上:35自由度2足2腕型ロボットにおける視覚に基づく上肢下肢統合

動作の実現,第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1995) pp.1093-1094

- [10] 岡田,金広,加賀美,稲葉,井上:卓上ヒューマノイドによる視覚誘導型全身行動の研究システム,第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2000) pp.591-592
- [11] 星野,稲葉,井上:抱きかかえが可能な人型ロボットにおける人になじむ動作の実現,第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1997) pp.759-760
- [12] 田宮,稲葉,井上:操縦型二足二腕ロボットにおける片足立脚時の全身によるバランス機能の実現,第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1997) pp.777-778
- [13] 小川,加賀美,田宮,稲葉,井上:2台の小型人間型ロボットにおける全身を用いた物体の受渡し行動,第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1997) pp.783-784
- [14] 小川原,二井,金広,稲葉,井上:柔軟皮膚埋め込み型触圧センサを用いた人間型ロボットの着座動作,第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1998) pp.1361-1362
- [15] 稲葉,加賀美,井上:リモートブレインロボットの展開—リモートブレインロボット 春プロジェクト 96:その1—,第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1996) pp.349-350
- [16] 中井,岡田,佐藤,堺,木野,水内,國吉,稲葉,井上:関節のソフトウェアサーボが可能な第三世代リモートブレインロボットの開発,第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) pp.785-786
- [17] 早稲田大学ヒューマノイドプロジェクト:ヒューマノイドプロジェクト第一次成果発表会—人間とロボットのインタラクション—(1997)
- [18] 橋本,成田,白井,高西,笠原,小林,菅野:人間共存ヒューマノイドロボット:Hadaly-2,第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1997) pp.761-762
- [19] 森田,萱場,橋本,菅野:人間共存ロボット WENDYの身体システム構成,第3回ロボティクスシンポジウム(1998) pp.113-118
- [20] 山口,井上,西野,玄,高西:視覚情報取得機構を有する人間形2足2腕ロボットの全体設計,第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1996) pp.723-724
- [21] 橋本,成田,小林,高西:プラットフォームとしての2足歩行型ヒューマノイド:WABIAN,第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1997) pp.763-764
- [22] 山口,曾我,青柳,高西:多様な全身運動を可能とする2足歩行型ヒューマノイドロボットの開発,第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1998) pp.833-834
- [23] 玄,青柳,Setiawan,山口,高西:2足歩行型ヒューマノイドロボットと人間との物理的インタラクション—手を用いた人間追従歩行—,第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1998) pp.951-952
- [24] 山口,曾我,Setiawan,高西:2足歩行型ヒューマノイドロボットの全身運動パターン生成ソフトウェア MotionMaker 97の開発,第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1998) pp.1103-1104

- [25] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [26] 加賀美, 近野, 陰山, 柁沢, 稲葉, 井上: 視覚行動統合研究のための車輪移動上半身型ヒューマノイド H4 の設計と開発, 第16回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1998) pp.835-836
- [27] 長阪, 近野, 西脇, 北川, 杉原, 稲葉, 井上: ダイナミックヒューマノイド H5 の開発, 第16回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1998) pp.837-838
- [28] 西脇, 杉原, 加賀美, 金広, 稲葉, 井上: 全身行動型ヒューマノイド「H6」の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00講演論文集 (2000) 2p2-79-110 (1)-(2)
- [29] 西脇, 加賀美, 稲葉, 井上: 全身行動型ヒューマノイド「H7」の開発と歩行システムの実装, 平成13年電気学会電子・情報・システム部門大会予稿集 (2001) pp.II-93-96
- [30] 長阪, 稲葉, 井上: 体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化, 第17回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1999) pp.1193-1194
- [31] 長阪, 稲葉, 井上: 動力学的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計, 第17回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1999) pp.1207-1208
- [32] 西脇, 北川, 長阪, 杉原, 稲葉, 井上: ダイナミックヒューマノイド「H5」における視覚運動型踏み出し動作の実現, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMEC '99) (1999) 2P1-78-111
- [33] 北川, 長阪, 西脇, 稲葉, 井上: 遺伝的アルゴリズムを用いた人間型ロボットの脚腕協調動的起立動作の生成, 第17回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1999) pp.1191-1192
- [34] 加賀美, 岡田, 西脇, 杉原, 稲葉, 井上: プレーンセグメントファインダによるヒューマノイドロボットの行動一感覚行動統合全身型ヒューマノイド H6 での実現一, 第18回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2000) pp.1471-1472
- [35] 西脇, 杉原, 加賀美, 稲葉, 井上: 素軌道の合成・接続によるヒューマノイドの目標歩行のオンライン生成一感覚行動統合全身型ヒューマノイド H6 での実現一, 第18回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2000) pp.1473-1474
- [36] 西脇, 加賀美, 國吉, 稲葉, 井上: 目標 ZMP 追従軌道高速生成法に基づくヒューマノイドのオンライン歩行動作生成, 第19回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2001) pp.985-986
- [37] 道方, 西脇, 加賀美, 國吉, 稲葉, 井上: 人間型ロボットの遠隔操作支援のための三次元視覚を用いたリーチング動作生成, 第19回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2001) pp.993-994
- [38] 社団法人日本ロボット学会, 財団法人製造科学技術センター: 人間協調・共存ロボットシステム (HRP) シンポジウム, 一人間型ロボットは何をめざすかー予稿集 (2002)
- [39] 財団法人製造科学技術センター, 独立行政法人産業技術総合研究所: 人間協調・共存ロボットシステムの研究開発一働く人間型ロボットの特別デモ公開一, MSTC・産総研共同プレス発表資料 (2002)
- [40] 横井: ヒューマノイドロボットによるロコモーションの次なる展開, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3 (2002) pp.267-269
- [41] 平井, 仲山: ロボットプラットフォームの製作および高機能ハンドの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.8-15
- [42] 横井, 金子, 金広, 藤原, 梶田, 比留川: ヒューマノイドロボット (HRP1S) による歩行実験, 第19回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2001) pp.169-170
- [43] 境, 村瀬, 稲葉, 井上: HRP 仮想プラットフォーム検証用ハードウェアモデル, 第17回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1999) pp.1211-1212
- [44] 村瀬, 安川, 境, 植木: 研究用小型ヒューマノイドの設計, 第19回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2001) pp.789-790
- [45] 富士通オートメーション (株), (株) 富士通研究所, 小型ヒューマノイドロボット「HOAP-1」新発売, プレスリリース (2001), <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2001/09/10.html>, 2001
- [46] 山崎, 松井, 宮下, 北野: ヒューマノイド PINO—ヒューマノイドプラットフォームとしての外装と構造一, 第18回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2000) pp.921-922
- [47] 古田, 富山: 小型パーソナルヒューマノイド Mk.5 とそのプラットフォームシステムの開発一階層制御系の実装検証用ロボットシステム一, 第18回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2000) pp.1477-1478
- [48] 黒木, 石田, 山口: 小型二足歩行エンターテインメントロボット, 第19回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2001) pp.1093-1094
- [49] ソニー (株): 小型二足歩行エンターテインメントロボットを開発—独自開発のアクチュエータと全身協調制御による多彩なパフォーマンスを実現—, 技術・研究開発, プレスリリース (2000), <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200011/00-057a/index.html>
- [50] 黒木, 石田, 長阪, 山口: 高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4 X, 第20回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (2002)
- [51] ソニー (株): 高度な運動性能と豊かなコミュニケーションを実現した小型二足歩行エンターテインメントロボットを開発, プレスリリース (2002), <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200203/02-0319/>
- 1.2 拟人机器人的运动控制与动作规划
- [1] 山口, 曾我, 井上, 高西: 2足歩行型ヒューマノイドロボットの開発—全身協調型2足歩行制御—, 第3回ロボティクスシンポジウム予稿集 (1998) pp.189-196
- [2] 山口: 2足歩行ロボットの現状と事例紹介〈その2〉早稲田2足歩行ロボットの概要, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) Vol.119, No.6 (1999) pp.766-768
- [3] 長阪, 稲葉, 井上: 動力学的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計, 第17回日本ロボット学会学会学術講演会予稿集 (1999) pp.1207-1208
- [4] 西脇, 杉原, 加賀美, 稲葉, 井上: 素軌道の合成・

- 接続によるヒューマノイドの目標歩行のオンライン生成一感覚行動統合全身型ヒューマノイドH6での実現, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2000) pp.1473-1474
- [5] 西脇, 加賀美, 國吉, 稲葉, 井上: 目標ZMP追従軌道高速生成法に基づくヒューマノイドのオンライン歩行動作生成, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) pp.985-986
- [6] 横井, 金子, 金広, 藤原, 梶田, 比留川: ヒューマノイドロボット(HRP1S)による歩行実験, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) pp.169-170
- [7] 梶田, 金広, 金子, 藤原, 横井, 比留川: 三次元倒立振子モードに基づく2足歩行パターン生成, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) pp.171-172
- [8] K. Hirai: Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (1997) pp.500-508
- [9] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: The Development of Honda Humanoid Robot, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation (1998) pp.1321-1326
- [10] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [11] 黒木, 石田, 山口: 小型二足歩行エンターテインメントロボット, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2001) pp.1093-1094
- [12] Y. Kuroki, T. Ishida, J. Yamaguchi, M. Fujita and T. T. Doi: A small biped entertainment robot, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.1 (2002) pp.6-12
- [13] 黒木, 石田, 長阪, 山口: 高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボットSDR-4X, 第20回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2002)
- [14] M. Vukobratović (加藤一郎, 山下忠訳): 歩行ロボットと人工の足, 日刊工業新聞社(1975)
- [15] 高西: 2足歩行ロボットの動歩行に関する研究, 早稲田大学博士論文(1988)
- [16] 山口: 2足歩行ロボットの安定歩行に関する研究, 早稲田大学博士論文(1997)
- [17] 高西, 桑田, 松熊, 山口, 加藤: 未知の外力下における2足歩行~横方向の未知外力に対する歩行制御方式の開発~, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1991) pp.321-324
- [18] R. Stuart and P. Norvig (古川康一監訳): エージェントアプローチ 人工知能(第二版), 共立出版(1998) (原著 Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice-Hall (1995))
- [19] J. Reif: Complexity of the Mover's Problem and Generalizations, Proc. IEEE Symp. FOCS. (1979) pp.421-427
- [20] L. Kavraki, P. Svestka, J.-C. Latombe and M. Overmars: Probabilistic roadmaps for path planning in high dimensional configuration spaces, IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol.12, No.4 (1996) pp.566-580
- [21] S. Gottschalk, M. C. Lin and D. Manocha: OBB-Tree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection, Proc. of ACM Siggraph '96 (1996)
- [22] T. Hudson, M. Lin, J. Cohen, S. Gottschalk and D. Manocha: V-COLLIDE: Accelerated Collision Detection for VRML, Proc. of VRML '97 (1997)
- [23] S. LaValle and J. Kuffner: Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects, Fourth Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (2000)
- [24] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. J. Kuffner, K. Okada, M. Inaba and H. Inoue: Low-level Autonomy of Remote Operated Humanoid Robot H6 & H7, 10th Int'l Symp. of Robotics Research (2001) pp.51-55
- [25] M. Inaba, F. Kanehiro, S. Kagami and H. Inoue: Vision-Equipped Apolike Robot Based on the Remote-Brained Approach, Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (1995) pp.2193-2198
- [26] O. Lorch, J. Denk, J. F. Seara, M. Buss, F. Freyberger and G. Schmidt: ViGVVaM-An Emulation Environment for a Vision Guided Virtual Walking Machine, Proc. of IEEE-RSJ Int'l Conf. on Humanoid Robotics (2000)
- [27] 田宮幸春, 稲葉雅幸, 井上博允: 人間型ロボットの片足立脚動作における全身を用いた実時間間バランス制御, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 (1999) pp.268-274
- [28] J. J. Kuffner, S. Kagami, M. Inaba and H. Inoue: Dynamically-Stable Motion Planning for Humanoid Robots, Proc. of IEEE-RSJ Int'l Conf. on Humanoid Robotics (2000)
- [29] 藤原清司, 梶田秀司, 金広文男, 金子健二, 横井一仁, 比留川博久: ヒューマノイドの腕の障害物回避動作, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演概要集(2001)
- [30] K. Yamane and Y. Namamura: Dynamics Filter-Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures, Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation (2000) pp.688-695
- 1.3 仿人作業
- [1] 野呂影勇編: 図説 エルゴノミクス, 日本規格協会(1990)
- [2] 黒川隆夫: ノンバーバルインタフェース, オーム社(1994)
- [3] J. Castaing, J. J. Santini 著, 井原秀俊訳: 図解 関節・運動器の機能解剖 上巻一上肢・脊柱編, 協同医書出版社(1986)
- [4] 岡田昌史, 中村仁彦: サイバネティックショルダの開発一人間の肩の動きを模倣した3自由度機構一, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5 (2000) pp.690-698
- [5] M. E. Rosheim: Robot Evolution-The Development of Anthrobotics, John Wiley & Sons, Inc. (1994)
- [6] 岩田浩康ほか: 人間共存ロボットのための全身触覚インタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.20,

No.5 (2002) pp.543-549

- [7] I. A. Kapandji 著, 荻島秀男監訳, 嶋田智明訳: カバンディ 関節の生理学 I 上肢, 医歯薬出版 (1986)
 - [8] 佐藤方彦監修: 人間工学基準数値式便覧, 技報堂出版 (1992)
 - [9] 前野隆司ほか: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の関係, 機論 (C), Vol.63, No.607 (1997) pp.247-254
 - [10] 加藤一郎編: 図解 メカニカルハンド, 工業調査会 (1977)
 - [11] S. C. Jacobsen et al.: Design of the UTAH/M. I. T. Dexterous Hand, Proceedings of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (1986) pp. 1520-1532
 - [12] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch and H. Liu: DLR's Multisensory Articulated Hand, Part I: Hard and Software Architecture, Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (1998) pp.2081-2086
 - [13] 川崎晴久ほか: 研究用プラットフォームをめざした分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド, 機論 C, Vol.66, No.651 (2000) pp.3672-3678
 - [14] 館璋ほか: HRP 遠隔操作プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.16-27
 - [15] 中島千明: アミューズメントパークのロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3 (1998) pp.311-312
 - [16] 中嶋勝己ほか: 等慣性マスタアームとマスタスレーブシステムの開発, 川崎重工技報, No.10 (1988) pp.15-22
 - [17] 脇田優仁ほか: 知的モニタリングシステムとその宇宙用遠隔操作ロボットへの適用, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.4 (1999) pp.540-548
- 1.4 以拟人机器人为媒介的认知科学研究
- [1] C. Breazeal and B. Scassellati: A context-dependent attention system for a social robot, Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI99) (1999) pp.1146-1151
 - [2] C. Breazeal: Designing Sociable Robots. MIT Press (2002)
 - [3] B. Adams, C. Breazeal, R. Brooks and B. Scassellati: Humanoid robots: A new kind of tool, IEEE Intelligent Systems, Vol.15, No.4 (July/August, 2000) pp.25-31
 - [4] S. Baron-Cohen, H. Tager-Flusberg and D. J. Cohen (eds.): Understanding Other Minds: Perspectives from Autism, Oxford University Press (1993)
 - [5] H. Kozima: Infanoid: An Experimental Tool for Developmental Psycho-Robotics, International Workshop on Developmental Study, Tokyo (2000)
 - [6] K. Nakadai, T. Lourens, H. G. Okuno and H. Kitano: Active Audition for Humanoid, Proceedings of 17th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2000) pp.832-839
 - [7] H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, T. Maeda, T. Kanda and R. Nakatsu: Robovie: A Robot Generates Episode Chains in Our Daily Life, Proceedings of 32nd International Symposium on Robotics (ISR 2001) pp.1356-1361
 - [8] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平: 身体表現を用いた人とロボットの共創対話, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.6 (2001) pp.1348-1358
 - [9] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平: 人-ロボットの対話におけるロボット同士の対話観察の効果, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-D-I, No.4 (2002) pp.380-389
 - [10] T. Ono, M. Imai and T. Etani: Robots as Human Peers: Cognitive Conditions of Human-Robot Interaction, Proceedings of The Second International Conference on Cognitive Science (ICCS'99) pp.693-696
 - [11] 横山真男, 青山一美, 菊池英明, 帆足啓一郎, 白井克彦: 人間型ロボットの対話インターフェースにおける発話交替時の非言語情報の制御, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2 (1999)
 - [12] 小林哲則, 白井克彦: ヒューマノイドロボットにおけるマルチモーダル会話インターフェース, 電子情報通信学会技術報告, SP 99-113 (1999) pp.121-126
 - [13] 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基: 発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C), Vol.66, No.648 (2000) pp. 251-258
 - [14] 山本浩司, 水谷研治: 高齢者コミュニケーション支援システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.192-194

第2章 微机器人学

随着微加工技术的发展,以微驱动器、微传感器为代表的各种各样的装置开始实用化,而集成了这些装置的微机器人也不断涌现出来。本章将对具有代表性的微驱动器、微传感器、微机器人、微操作系统及今后人们所期待的纳米机器人进行概括的解说^[1~8]。

2.1 微驱动器

制作微型机器,其关键问题是微驱动器。必须很好地选择符合用途要求的微驱动器。本节将就微驱动器进行介绍。在此之前,先考虑微驱动器的特征。

在考虑微驱动器时,尺度效应(scale effect)十分重要。如图2.1所示,在 $1\mu\text{m}$ 附近,与重力等惯性力相比,流体等产生的黏性力开始占上风。到了纳米区域,范德华力等原子间的作用力则变得越来越大。

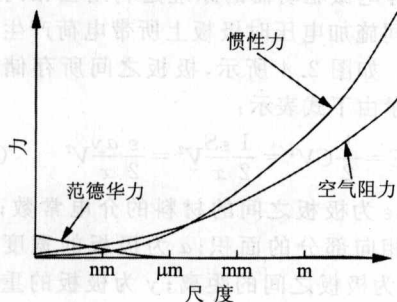


图2.1 尺度效应

起主导作用的力发生变化的一个原因在于体积与表面积的影响的变化。一般来说,如果将物体小型化,那么其体积将与其长度的立方成比例地减少,而表面积则是与长度的平方成比例地减少。因此,与体积(质量)占主导的惯性力等相比,在微小领域,表面积所影响的黏性力等的作用变得越来越大。将各种力进行整理后,得到表2.1。在微驱动器设计中,应该充分考虑表2.1中列举的微米级及以下量级范围内的效应。

表2.1 按照尺度效果的力的分类

力	公 式	方 次	
惯性力	Ma	L^3	M 为质量 a 为加速度
黏性力	cv	L^2	c 为黏性系数 v 为速度
弹力	Kx	L	K 为弹簧常数 x 为位移
压电应变	dV	L^3	d 为压电常数
静电力	$\frac{\epsilon S V^2}{2 d^2}$	L^2	ϵ 为介电常数 S 为极板面积 V 为极板间电压 d 为极板间距离

在设计微驱动器时将遇到的一个问题是摩擦学(tribology)问题。tribology是指与摩擦及滑相关的一门学科。传统机器都是借助于轴承来降低摩擦的。微驱动器里无法应用轴承(如球轴承等),因此需要找到一个替代的方法。其中一个制作基于物质特性的所谓固体润滑轴承。如果是在硅基上制作微型电机,则采用氮化硅等来减少磨损。另外还有氟树脂减小摩擦力的例子。再如,空气轴承等。硬盘的圆盘轴承就仰仗了这种技术,即把空气吸入转轴的周围,在轴和轴承之间形成空气层,从而能够消除因直接接触所造成的摩擦。其结果是高速且稳定的转动得以实现。

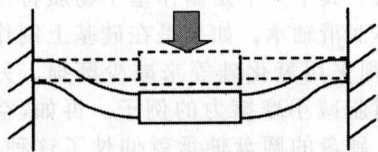
此外,在结构的小型化过程中,机构的限位方法也成了问题。在微驱动器中,由于很难再另装入弹簧等限位机构,因此往往利用机构本身的特性来充当弹簧机构。举一个例子进行说明,静电驱动器等中经常见到将具有梁状结构的弹性体作为弹簧来使用。另外,还有铰链结构,该结构在构件的某个部位切出缺口,使应力集中在缺口附近而形成旋转关节。这些结构直接由材料的特性所决定,因此应该对它们的特性,例如,耐久性等进行研究。

由上述可知,微驱动器除了借助于传统的驱动器技术以外,还引入了其他各种各样的新技术。下面就具有代表性的微驱动器加以介绍。

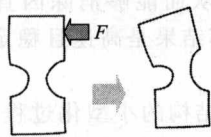
2.1.1 压电微驱动器

在微驱动器中,压电微驱动器是最实用的驱动器,多用于显微镜平台的微型移动机构中。压电微驱动器的特征是由具有压电效应的元件所形成的固体微驱动器。与其他微驱动器不同,它可以单独使用,因此有利于小型化。

压电效应是正压电效应和逆压电效应的总称,压电元件一般都具有这两种特性^[9]。正如图 2.2 所示,正压电效应是指针对变形产生电压的现象,而逆压电效应则是指由于施加电压而产生变形的现象。正压电效应已经作为传感器或打火机等点火系统得到实用化。微驱动器利用的则是逆压电效应。尽管微驱动器的变形量很小,只有变形方向上元件长度的大约 0.05%,而且要求施加很高的电压也不大容易,但是其单位体积产生的力量大,这是其他微驱动器所没有的优点。另外,响应的高速性也是它一个很重要的特性。



(a) 支撑梁结构

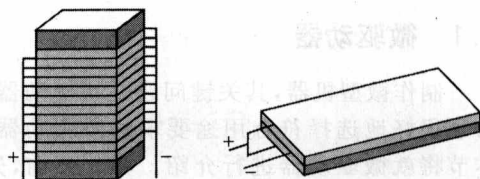


(b) 铰链结构

图 2.2 支撑结构

图 2.3 给出了典型的压电微驱动器的结构。如果按应用形式来进行分类,以利用微小变形,输出力为应用目的为例,可以分为利用单独元件或将元件叠加起来应用的情形和分别以单晶片或双晶片的形式应用获得大变形的情况。典型的压电微驱动器有 PZT,它是 Pb、Zr、Ti 的氧化物的烧结体,即所谓的陶

瓷。与此相比,还有 PVDF 等膜状压电材料。已经付诸实用的一种机构是大家所熟知的超声波电机。它利用压电元件的变形,使张贴在压电元件上的弹性材料产生表面椭圆振动,从而引起弹性材料挤压转子导致转动。尽管这种电机在寿命方面还有一点问题,但是它具有在低速到高速的所有转速范围内都能输出大转矩等的优良特性。一个特殊的应用事例是直接将薄片状元件作为蜂鸣器的声源。由上述可知,根据用途的不同,可以通过改变压电微驱动器的形态来满足多种多样的使用目的,因此今后它有望得到进一步的发展。



(a) 层叠型压电微驱动器

(b) 双晶片型压电微驱动器

图 2.3 典型的压电微驱动器的结构

2.1.2 静电微驱动器

静电驱动器的原理是利用在相向的极板之间施加电压时极板上所带电荷产生的库仑力。如图 2.4 所示,极板之间所存储的静电能量由下式表示:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{x} V^2 = \frac{\epsilon}{2} \frac{ay}{x} V^2 \quad (2.1)$$

式中, ϵ 为极板之间的材料的介电常数; S 为极板相向部分的面积; a 为极板的宽度与长度; x 为极板之间的距离; y 为极板的重叠部分的长度。

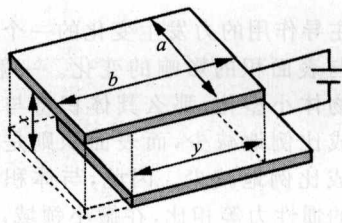


图 2.4 静电微驱动器的基本原理

这时,沿极板垂直方向 x 和极板平行移动方向 y 的力可以由下式计算:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\epsilon a y}{2} V^2 \right) = -\frac{\epsilon a y}{2 x^2} V^2 \quad (2.2)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\epsilon a y}{2} V^2 \right) = \frac{\epsilon a}{2 x} V^2 \quad (2.3)$$

由此可知,两片极板彼此将互相吸引。但在本节中,我们只讨论向极板之间施加电位差的情况,即让极板带不同极性电荷的情况。既然是利用库仑力,那么也包括极板带相同极性电荷的情况。不过在相向的极板上维持相同极性的电荷很难办到,因此只有在特殊情况下,如在单侧极板采用介电体而不是电极时才能观察到这种现象。如果让极板带有相同极性的电荷,那么排斥力将起重要作用。

为了有效地将静电力用到微驱动器上来,必须减小极板之间的距离,同时提高极板之间的电压。即使如此,由于产生的力非常小,所以常采取层叠处理等手段。

图2.5(a)给出利用相向极板沿垂直方向的引力制作微探针的例子^[10]。在这个例子中,与极板间距离相比,极板面积很大,其结

果使作用力变大。但是由于位移取决于极板之间的距离,因此位移也不能一味增大。与此相比,图2.5(b)利用与极板方向平行的作用力,倒是能输出较大的位移^[11]。但与极板平行方向的作用力很弱,通常也需要通过层叠化处理得到移动所必需的作用力。

图2.5(b)中的滑动片采用介电体。这样,由于介电体表面所带电荷的扩散速度较慢,再加上同极性电荷的排斥作用,因此尽管相互作用的时间很短暂,却能使介电体浮起来,成功地降低了摩擦力。

图2.5(c)是基于MEMS(Micro Electro Mechanical Systems,机电系统)概念的静电微驱动器中十分常见的一种梳状静电微驱动器^[12]。电极改为梳状之后扩大了极板的面积。

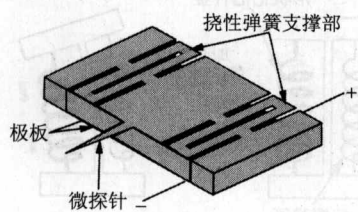
上述静电微驱动器的问题主要有前面所提及的需要施加高电压的条件,灰尘进入极板之间会引起绝缘层破坏等。

2.1.3 电磁微驱动器

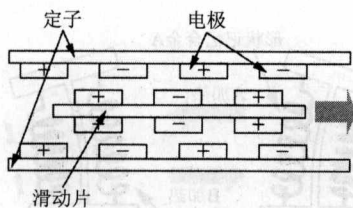
电磁驱动器是利用电流在导线中流过时产生的劳伦茨力或永久磁铁的磁力而开发出来的驱动器。为了使驱动器的输出能足以满足实用数量级的作用力,通常必须将导线绕制成线圈,以提高电流密度。线圈体积决定了力的大小,线圈结构呈立体形状,其实对于微驱动器而言,这些都是不利因素。但是随着微制造技术的发展,采用诸如薄膜线圈、新材料等已经能够制作极细导线缠绕的高密度线圈,使电磁驱动器用作微驱动器成为可能。

电磁微驱动器可以分为两种:一种是将所有部件都内置的微驱动器;另一种是在外部生成磁场实现驱动的微驱动器。要将所有部件都内置在微驱动器内将面临如何解决部件小型化的问题,但是它在将多种微驱动器集成为多自由度系统方面具有优势。另外,如果利用外部磁场进行驱动,由于磁场发生源被置于外部,化解了磁场发生源大小的约束,因此设计简单,而且转子也容易小型化。其缺点是在构建多自由度系统时有难度。

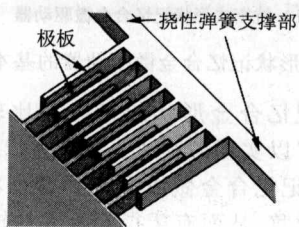
图2.6给出的是现有电磁微驱动器中经常使用的直流电机通用结构^[13]。在这个结构中,电磁线圈及永久磁铁的大小应该根据所需转矩而定,所以它的体积是受到限制的,而



(a) 平行平板型静电微驱动器做成的微探针



(b) 膜状静电微驱动器



(c) 梳状静电微驱动器

图 2.5 典型的静电微驱动器

且在这种结构中实现电刷等部件的小型化也非易事。

在电磁微驱动器小型化的进程中,转子逐渐变小,惯性矩也随之变小,结果使转速增大。因此,从电磁微驱动器实用化的角度考虑,还需要有小型减速器。到目前为止,人们已经试制了线切割放电加工的微减速器。这种减速器的行星齿轮机构虽然很适合小型化,但是在其轴承的结构和寿命方面尚有问题,至今仍然未能顺利解决^[14]。

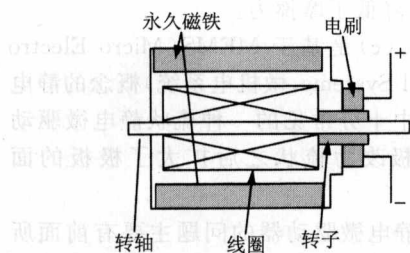
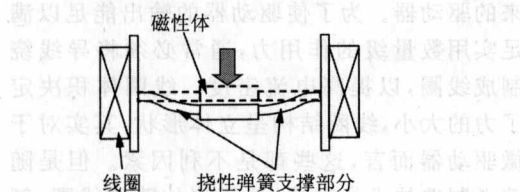
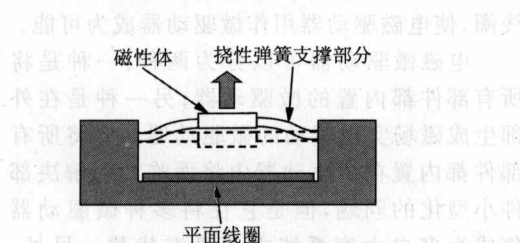


图 2.6 直流电磁电机的基本结构

如图 2.7 所示,在目前的研究中常见的电磁微驱动器的结构多数利用电磁转矩。图 2.7(a)给出外部生成磁场的情况,图 2.7(b)则是磁场生成机构全部被内置的情况^[1]。



(a) 基于外部磁场的电磁转矩微驱动器



(b) 基于平面线圈的电磁转矩微驱动器

图 2.7 利用电磁转矩的微驱动器

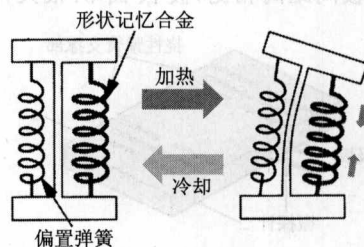
在图 2.7(b)中,利用薄膜制成的平面线圈能产生磁场。尽管平面线圈很难生成强磁场,但它很容易用金属表面光刻法来进行制作,因此具有与驱动电路同时制作形成等优点。不过在电路周围形成的磁场将诱发电磁噪声,因此必须考虑对电磁的绝缘问题。

2.1.4 形状记忆合金微驱动器

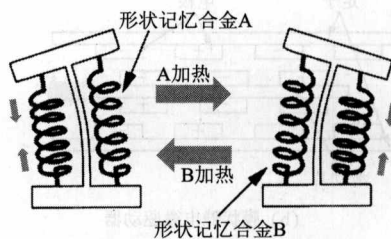
形状记忆合金微驱动器^[15,16]是基于形状记忆合金特性的微驱动器。该特性是指由 Ti-Ni 所代表的,在高温稳定的母相与在低温稳定的马氏体之间的相变。当该合金处于马氏体时,结晶很容易在外力作用下改变形状,但加热可以引起返回母相的逆相变,从而使其恢复到初始形状,展示了形状记忆效果。

形状记忆合金能产生 100MPa 以上的巨大应力和 2%~5% 的变形。这个量级在固体微驱动器中都算是比较可观的,因此人们非常看好它作为微驱动器的前景。

将形状记忆合金用作微驱动器时,像图 2.8(a)那样,要用偏置弹簧事先向形状记忆合金施加预应力,然后进行加热,使形状记忆合金呈现收缩状态;反之,冷却又能将它恢复到初始状态。图 2.8(b)描述同样的原理,不过两条形状记忆合金彼此采用了抗衡式结构。



(a) 采用偏置弹簧的形状记忆合金微驱动器



(b) 抗衡式形状记忆合金微驱动器

图 2.8 形状记忆合金微驱动器的基本结构

形状记忆合金形状的自由度比较高,通过喷镀还可以实现薄膜化。按照图 2.8(a)所示,将形状记忆合金做成螺旋弹簧形状,能获得较大的位移,从而有望得到较大的输出。

形状记忆合金存在的问题是加热或冷却需要时间过程,因此其响应速度较慢,而且伴

随着加热还有能量效率的问题。由于有望通过减少体积来提高加热和冷却的效率和能量效率,因此在应用微驱动器的场合,形状记忆合金的特性能够比较有效地得到发挥。

2.1.5 超磁致伸缩微驱动器

超磁致伸缩微驱动器^[17]是利用在磁场作用下产生变形的超磁致伸缩元件的微驱动器。超磁致伸缩元件在磁场的作用下其结晶方向趋于一致,从而沿磁场方向表现出变形。它与压电微驱动器同样都属于固体微驱动器,与压电微驱动器相比,超磁致伸缩微驱动器能获得更大的变形和更大的输出。

目前,存在的问题是对超磁致伸缩元件周围磁场的控制不大容易,图 2.9 表示,从外部线圈控制磁场的方向,可以实现图 2.9 中挡片的开合控制。

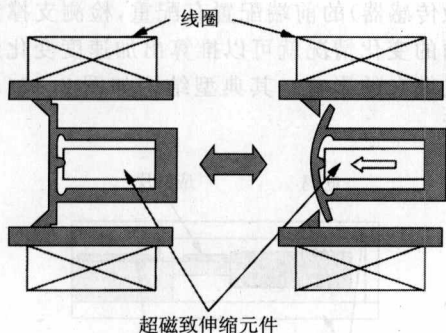


图 2.9 采用超磁致伸缩微驱动器的片状阀

超磁致伸缩元件的优点是它能从外部磁场加以控制,不必装载能源,因而它不受动作时间等的限制。但是,如果机器人内部同时装有传感器,那么驱动超磁致伸缩元件的磁场可能会给传感器的电路带来影响,这时必须考虑磁场绝缘的对策。

2.1.6 高分子微驱动器

高分子微驱动器又分为高分子膜片微驱动器和高分子凝胶微驱动器。高分子膜片微驱动器的材料为在压电微驱动器一节中介绍的 PVDF^[18],或者因低电压、大变形特性而备受瞩目的 ICPF (Ion Conductive Polymer Film, 离子导电聚合物膜)^[19,20]。高分子凝胶微驱动器则采用高吸水性凝胶等。到目前为止,人们正在开展高分子微驱动器在微型泵和主动导管等方面的应用研究(图 2.10)。

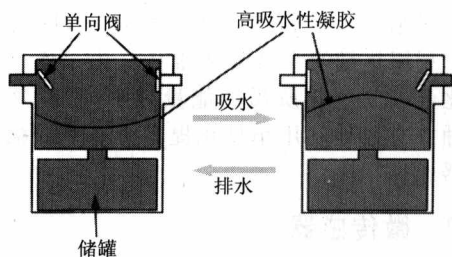


图 2.10 采用高分子微驱动器的微型泵

与其他的微型驱动器相比,高分子微驱动器最大的不同在于它的柔软性非常好。反过来,其缺点则是产生的应力较小等。目前,高分子微驱动器的响应速度都比较低,在数赫兹左右,因此它不大适合快速响应的实际应用场合。

2.1.7 光微驱动器

光微驱动器^[21,22]包括应用光致伸缩元件的固体微驱动器和利用光传播热量的微驱动器。尽管有时后者也被归类到热量型驱动器中,但由于它是利用光来作为驱动的媒介,因此本节仍然把它看做是光微驱动器。

光致伸缩元件 PLZT (Pb-Zr-La-Ti) 是大家所熟知的。光致伸缩元件是具有块状光发电效应和逆压电效应的元件,而变形则是这两种效应的组合结果。当受到 365 ~ 366nm 波长的紫外线照射时,PLZT 将发生约 0.01% 的变形。由于变形量太小,所以在很多情况下都采用双晶片结构。

到目前为止,已经试制了如图 2.11 所示的微型镊子及光驱动微继电器等。但是,由于块状光发电效应的响应很糟糕,结果用它制作出来的微驱动器的响应也不快,这是其实用化过程中的一大难题。

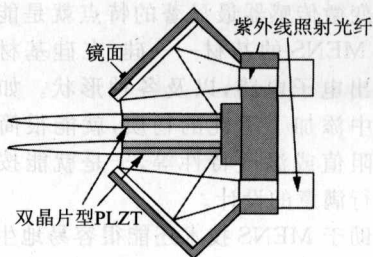


图 2.11 微型光镊

另一种光微驱动器也已经被开发出来,它在光的照射下产生热量将液体气化,利用

体积膨胀产生的作用力来进行驱动,即它是属于利用热量的光微驱动器^[23]。由于通过小型化可以使气化所需的能量减少,因此这是一种能有效地利用小型化提高热效率的微驱动器。

2.2 微传感器

各种各样的微传感器之所以依靠 MEMS 技术得以实现,是因为 MEMS 技术建立在硅材料的基础上,而硅本身就具有半导体的特性。直接将传感器的检测部分做在硅片上有以下优点:

① 检测部分和电路部分能集成为一个整体。

② 检测部分和电路部分距离近,能减少线之间的噪声。因此,它能检测出微弱信号,从而可以制作出高灵敏度的传感器。

③ 能在芯片上做出很多传感器,使之阵列化和多自由度化。

由于其具有以上特性,到目前为止已经开发出了各种各样的微传感器。下面介绍一些具有代表性的微传感器。

2.2.1 应变微传感器

利用压电效应制作的应变微传感器是微传感器中很早得到应用的一种传感器^[24]。

所谓压电效应,是指在晶体上施加压力(应变)导致晶体结构发生变化,从而产生电阻变化的现象。反过来,检测电阻的变化,就可以检测出所施加的压力或应变。

半导体硅有 p 型和 n 型两种。根据 p 型、n 型,以及晶体排列方向的不同,压电系数也有区别。因此,在 n 型硅上再生成 p 型硅,就能很容易地制造出应变微传感器。

应变微传感器最显著的特点就是能够直接利用 MEMS 的基材——硅,在硅基材上很容易做出电子电路,以及各种形状。如果在硅基材中添加了不纯的物质,就能很简单地改变电阻值或温度特性等,于是就能按照用途来进行满意的设计。

借助于 MEMS 技术还能很容易地生成挠性梁等弹性结构,即应力集中结构,并由此开发出很多微传感器,它们的灵敏度比传统应变微传感器更高,图 2.12 给出了典型结构的示例。

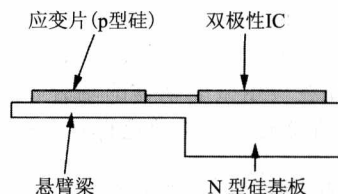


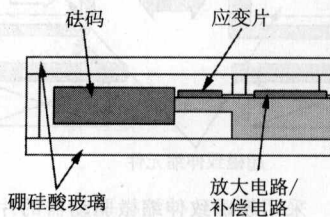
图 2.12 应变微传感器的结构

基于以上的优点,压电型应变微传感器在加速度传感器、压力传感器、力矩传感器等中都得到了应用。

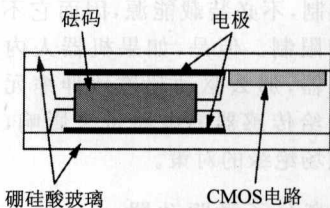
2.2.2 加速度微传感器

加速度微传感器有两种:一种属于压电型^[25],它是基于上节所述的应变微传感器;另一种属于静电容量型^[26],它并不是应变微传感器,而是电容传感器。

压电型加速度微传感器在支撑梁(带应变微传感器)的前端配置有配重,检测支撑梁弯曲的变化情况就可以推算出加速度变化给配重带来的影响。其典型结构如图 2.13(a)所示。



(a) 压电型加速度微传感器



(b) 静电容量型加速度微传感器

图 2.13 加速度微传感器结构

静电容量型加速度微传感器的原理是检测两个极板之间静电容量的变化,从而掌握夹在两个极板之间的配重的表现。图 2.13(b)给出了它的结构。静电容量一般都很小,通常是根据发射频率的变化来检测加速度变化给配重带来的影响。正因为敏感元件与检测电路十分贴近,集成度很高,所以线间电容

等的影响比较小,使得检测具有可行性。

通过改进极板结构等措施,已经开发出多自由度加速度微传感器。研究人员还利用振子加振等措施,开发出灵敏度更高的加速度微传感器。

2.2.3 压力微传感器

压力微传感器是通过压电或电容来测量膜片压力所造成的变形。它的基本原理与先前所说的加速度微传感器相同,但由于基准值设定方式等方面的要求形成了它自己比较特殊的结构形式。图 2.14 为压电阻型压力微传感器的结构^[1]。

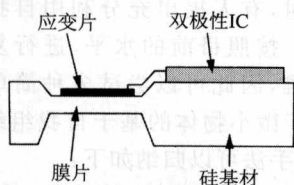


图 2.14 压电阻型压力微传感器的结构

可以与该结构同时制作 CMOS 电路,再将它们排成阵列状,就可以制成分布式压力微传感器。利用图 2.15 所示的压力微传感器阵列,不仅能测量出压力的分布情况,还可以借助于各个微传感器输出的相互对照,很方便地对特性的不一致性进行标定。

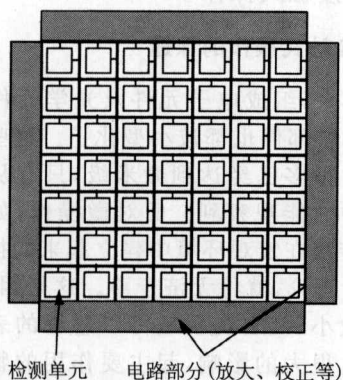


图 2.15 压力微传感器阵列

借助于 MEMS 等技术能够提高包括压力微传感器、加速度微传感器在内的各种微传感器的灵敏度和精度,但是在降低特性的偏离、提高原材料利用率、改善标定和封装来降低成本等方面仍有诸多今后亟待解决的问题。

福田敏南 石原秀则

2.3 微操作

2.3.1 微操作种类

如果处理对象物的大小或所要求的作业精度在 $1\text{mm} \sim 1\text{nm}$ 的范围内,那么该操作就被定义为微米/纳米作业^[1],或者简单地被称为微操作。近年来,微操作的需求量呈上升趋势。例如,在生物领域,操作细胞或 DNA 等微小生物物质的需求在急剧上升。还有在微系统加工、组装、维修工作中,微操作的重要性也在增加。微操作在基于碳素纳米材料的纳米装置应用研究中也做出了很大的贡献。目前,有关微操作的研究已经从装置的层面提升到系统的层面。

到目前为止,已经研究出了满足不同应用目的的各种微操作系统^[2~5]。在搭建微操作系统时,必须根据目的和操作对象选择合适的操作环境,并由此决定相应的观察系统和操作形态,而且还需要有合适的基础技术,以便改善操作内容,提高操作效率。

微操作从大小上看,从毫米到纳米的跨度达到 1×10^6 的幅度;从空间上看,跨度甚至达到 1×10^{18} 。在不同的作业环境中操作对象所受的物理影响也大相径庭。因此,根据不同的解决途径,系统搭建的方法也多种多样。按照操作对象的大小和操作环境,微操作系统可按图 2.16 所示进行分类^[6]。

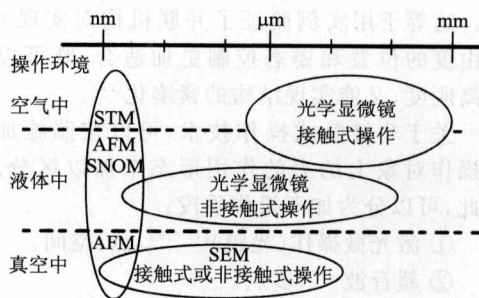


图 2.16 微操作系统分类

微操作的操作环境大体上分为在空气中、在真空中和在液体中三类。由此,可以决定观察操作对象所适用的观察系统。一般来说,搭建微系统的元器件大多是无机物的,在空气或真空中的操作较多。但是在生物领域中,操作对象是一些有机物,如细胞、微生物、DNA 等。在这种情况下,为了避免干燥,大

多在液体环境中进行操作。微操作系统的操作方式可以分为两类:一类是工具(末端执行器)与操作对象发生接触的接触式操作;另一类是不发生接触的非接触式操作。

接触式微操作系统,按照连杆机构的方式大体可以分为串联结构和并联结构。如果是搭建3个自由度的位置操作系统,那么串联结构就显示出机构简单,容易实现高精度定位控制系统的优点。另外,如果需要实现包括位置和姿态在内的6自由度系统,那么并联结构就比较合适,它显示出刚度高、结构紧凑等优点。

针对接触式操作技术,研究人员在结构的小型化、提高定位精度、高速化、扩大作业范围、增加自由度等方面进行了大量的工作。在理想情况下,自然是希望同时能满足以上这些条件。最初开展的工作是把手动操作的显微作业微机械手改造成电驱动。文献[7],[8]对驱动的原理进行了详细介绍。福田等在6自由度的集成设计和小型化方面进行了尝试^[9,10]。佐藤等明确地指出了微操作系统与传统工业机器人的区别,提出了以操作对象为中心的集约机械手的概念,并搭建了包括平台驱动在内的多自由度微操作系统^[2]。尽管这个系统是以串联机构为基础的,但是它在位置和姿态驱动机构的解耦方面下了很大的功夫。新井与谷川以并联连杆机构为基础,提出了6自由度并联微操作系统。这等于用实例验证了并联机构对实现6自由度的位置和姿态控制更加适合,既可以提高刚度,又能实现结构的紧凑化^[11]。

关于非接触式操作技术,可以按照施加于操作对象上的力的作用形态来加以区分。由此,可以分为如下操作手段:

- ① 激光微操作(光镊)^[12~28],点、空间。
- ② 超音波^[29],多点。
- ③ 毛细流动,面。
- ④ 电泳,面。
- ⑤ 介电泳^[30~33],空间。
- ⑥ 磁场,空间。

非接触式操作的优点是,即使是在封闭的空间内也能对操作对象实施操作;组合多种不同的方法,能减少外界的干扰,提高操作的正确性、操作的效率和速度。

根据不同的目的,分别使用不同的操作

方法或将多种操作方式进行组合可以提高作业效率。例如,在接触式方法中,在工具前端的控制中,工具与操作对象之间的相对位置与姿态的控制非常重要。此时,与其移动体积相对较大的工具,还不如移动小一点的操作对象,对能量的利用率来说更划算。由于操作对象的姿态变更可以采用非接触方式,因此有人提出了按接触式方式实施对解剖工具(如注入等)的三维位置控制,而按非接触式方式实施对操作对象的姿态控制的方案^[34~36]。

处理的对象数量越多,通过观察进行个别操作的难度就越大。因此,在操作大量的微小物体时,有人提出充分利用自我组织现象的方法。按照目前的水平,进行复杂操作还比较困难,因此可以尝试多种简单的排列方式。关于微小物体的基于自我组织的成形方式,主要手法可以归纳如下:

- ① 利用界面作用力(亲水性、疏水性、表面张力、表面电荷量等)。
- ② 利用静电力(库仑力、介电泳动力等)。
- ③ 利用化学结合力(氢键结合、配位结合等)。

关于基于自我组织的模式成形的方法有许多研究报告,如文献[37],[38]等。

2.3.2 接触式操作

1. 接触式操作的课题

近年来,组成电子元件及光学元件等的机械结构零部件也都被小型化了。这些零部件的尺寸很多已经达到微米级,只有从光学显微镜中才能观察到。面对微操作,如果仍然照搬传统在宏观环境中建立起来的操作技术和设计理论,就将无济于事。这是因为,物体变得微小后,宏观领域可以忽视的表面张力将产生很大的影响,起主要作用的物理规律也会有根本的变化。因此,在微操作方面,有必要确立基于微米/纳米领域的物理现象的新方法。特别是在空气中的微操作,与重力相比,范德华(Van Der Waals)力、静电力、液桥力将起决定性的作用。例如,假设硅颗粒的直径为 $1\mu\text{m}$,则其重力约为 $1\times 10^{-14}\text{N}$,与面积很大的硅基板之间产生的范德华力约为 $1\times 10^{-7}\text{N}$,两者之间的差异达到7个数

量级。在这里,范德华力是根据以下的近似公式进行计算的:

$$F = -\frac{Hd}{12z^2} \quad (2.4)$$

式中, H 为 Hamaker 常数; d 为微颗粒的直径; z 为分离距离, $H = 25.6 \times 10^{-20} \text{ J}$, $z = 0.4 \text{ nm}$ 。重力是与微颗粒大小的 3 次方成比例减小的,而范德华力却是与微颗粒大小的 1 次方成比例减小的。库仑力及电像力是与微颗粒大小的 2 次方成比例减小的,液桥力是与微颗粒大小的 1 次方成比例减小的。因此,微颗粒越小,其重力的影响就越可以忽略。在很多情况下,操作对象与工具表面或与环境之间的相互作用由黏附力起主导作用,成为操作的障碍。因此,有必要根据表面物理学,提出将相互作用力考虑在内的新思路。

将降低与控制黏附力的方法总结如下:

- ① 增大表面粗糙度。
- ② 利用表面粗糙度的差异。
- ③ 利用振动和加速度。
- ④ 利用温度的变化。
- ⑤ 利用压力的变化。
- ⑥ 利用静电力的变化。
- ⑦ 其他(表面处理、镀膜、功能性薄膜等)。

这些方法的概念归纳在图 2.17 中。关于减低与控制黏附力的措施,有几个研究事例。一个研究事例是,通过微细加工技术,在物体安装表面每隔 $10 \mu\text{m}$ 做出突起高度为数微米的微小突起(微型金字塔)网格,并将不易被氧化的金沉积到表面上,然后进行接地,这样可以收到减少黏附力的效果^[39]。文献[3]中论述了关于微小世界的物理现象及微操作。但是,黏附力产生的机制十分复杂,至今还有许多未知部分。

生命科学和生命工程领域非常期待有新的技术来代替人做微操作,使大量处理、反复处理、高速/高精度处理成为可能。特别是以形状性质转换为目的、对胚胎或细胞自由操作的技术更是被寄予厚望。对胚胎、细胞及微小活体组织的操作都是在液体中进行的。为了避免干扰(由干燥介质或工具操作导致)对操作产生不良影响,在液体中的微操作必须采取各种措施。一般来说,猪、牛之类家畜

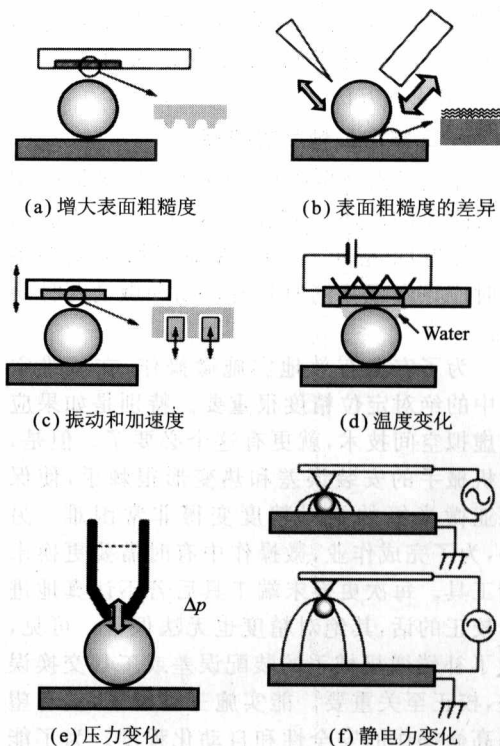


图 2.17 降低与控制黏附力的方法

的胚胎有 $100 \mu\text{m}$ 左右大小,不太容易受上述干扰的影响,因此其胚胎操作一般都采用接触式操作方法。

对微小物体的操作传统上都是采用二维操作。这主要是因为用数值孔径较大的镜头做显微镜观察时,焦深比较浅,不得不把观察平面作为操作平面。其结果导致将观察平面沿光轴方向进行移动的操作变得极其困难,因此在这种环境下的微操作必须要求非常娴熟。如果能够得到哪怕是虚拟的三维信息,也能够大幅度地改善操作性能。另外,现阶段的一大半操作都是在显微镜下手工完成的,人们期待操作性能的改善、操作时间的缩短和自动化程度的提高。因此,下面我们就来介绍一下显微镜下对微小物体实施三维操作时改善操作性能的各种措施。

2. 操作对象的固定

为了提高在液体中的操作性能,减轻操作人员的操作负担,提高自动化程度,首要的事情是固定好操作对象。操作对象被固定后,内力控制就容易实施了。若能按照喜欢的姿态方便地将操作对象固定在规定的位

上,那么就容易实现自动操作,并为批处理创造了条件。微小物体的固定方法有微型吸管^[7]、水压等方法。

3. 三维定位精度的提高

显微操作微机械手应该具有厘米级的移动功能和纳米级的定位精度,而且应该能满足三维空间运动。因此,在研发微机械手系统时应该考虑其同时具有宏动和微动两种功能。

为了安全有效地实施微操作,在三维空间中的绝对定位精度很重要。特别是如果应用虚拟空间技术,就更有这个必要了。但是,微机械手的安装误差和热变形很棘手,使保证亚微米级的绝对精度变得非常困难。另外,为了完成作业,微操作中有时需要更换末端工具。每次更换末端工具后若不认真地进行校正的话,其绝对精度也无法保证。可见,为了补偿微机械手的装配误差或工具交换误差,校正至关重要。能实施三维校正,就有望提高微操作的安全性和自动化程度。为了能校正工具前端的位置,必须先精确地测量出它的位置。如果工具是玻璃管,那么向玻璃管的内部引入照明,就可以加强工具前端的局部照明,提高对比度,对检测是有利的^[40]。在此基础上,如果再对各个驱动轴方向施加闭环控制,则可以实现 $1\mu\text{m}$ 以下的定位精度^[41]。目前,有人针对串联型、并联型机械手分别提出了基于最小二乘法的校正方法。

如果利用光学显微镜进行显微操作,那么就能够实时得到操作对象的实际图像。因此,反馈视觉信息的控制方法会很有效。石川等将高速视觉传感器引入微操作系统中,并证明了它的有效性。

4. 目视性的提高

高分辨率的光学显微镜的工作空间受到很严格的限制,使变更工具的姿态很困难。因此,为了提高操作性,注视点的自由选择就变得很重要。但是,光学显微镜的光轴与被观察对象的相对位置关系是固定的,因此视线选择受到限制,使目视性变得非常不好。若能够自由变更注视点,则可以提高目视性,改善操作性。但在实际使用中变更光学显微镜的光轴与被观察对象的相对位置关系显然是不现实的。因此,有人采用了搭建一个包

含观察对象在内的三维环境模型^[34],以便在虚拟空间(VR)内变更注视点的方法^[41]。

在拓宽显微镜的焦深方面,现在已经开发了基于全焦点显微镜相机的光学观察系统。该系统通过压电驱动器使变焦镜头进行高速移动,同时读入多幅不同焦点的图像,然后提取与焦点吻合的图像,再对这些焦点吻合的图像进行合成。

5. 力控制与安全性的提高

现在已经能够检测并利用作用于工具前端的作用力。图 2.18 是在工具的前端安装了 3 轴力觉微传感器(大小: $4.5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$)的工具前端的照片。该传感器是利用硅微加工技术制作的。该传感器根据硅的压电效应并借助于桥式电路获得硅悬臂梁的挠度,然后将其换算为力和力矩,于是可以独立测量出 xyz 三个方向的微小作用力(分辨率为 μN 量级)。因为是在接触型微机械手的工具前端附近进行力的检测,传感器部分的体积已经实现了小型化。这样不但能够缩短观测对象与检测点之间的距离,还能借助于力传感器提高工具前端的共振频率,使之不易受外界振动的干扰^[42]。该工具方向的一阶共振频率是 6.3kHz 。将该传感器用于作用力幅度较大的双向控制系统时,主/从机械手的高响应性对控制系统稳定性的贡献很大。在文献^[42]中,作者指出,通过压电元件驱动从机械手,可以提高并联型双向控制系统的反馈增益,从而提高从机械手的跟踪性能。

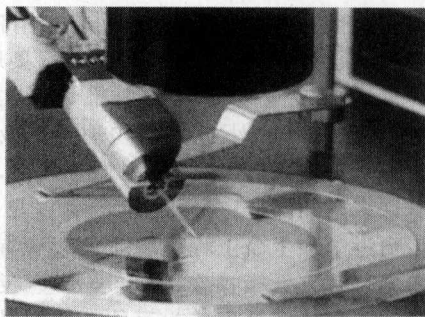


图 2.18 使用 3 轴微型力觉传感器的生物微操作手的前端(名古屋大学)

从微悬臂梁的挠度直接读取作用力的方式灵敏度很高,但是刚性低,很容易损坏。解决该问题的一个方法^[44]是利用凝胶体的压力传播特性,让悬臂梁产生变形。另外,有一种

触觉传感器,它通过压电驱动器让工具的前端产生共振,并读取工具前端与周围环境相接触时的阻抗变化,结果实现了高刚性和高灵敏度^[45]。图 2.19 给出在微吸管安装触觉传感器的照片。传感器呈圆筒形,直径为 1.6mm,长为 20mm,能将直径为 1mm 的微型吸管容纳其中,而且固定和更换也很方便。结果该传感器能检测出工具前端约 0.5mN 的接触作用力。我们知道,一般光学显微镜光轴方向的目视性不好,工具与平台存在碰撞的危险性,借助于这种高灵敏度的传感器和高速驱动器,可以提高系统的安全性。

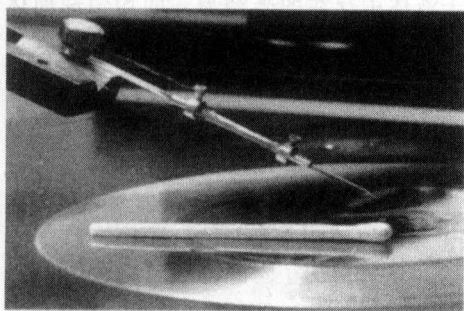


图 2.19 微触觉传感器(名古屋大学)

6. 工 具

根据作业需求各种各样的工具(末端执行器)已经被研发出来。微型钳就是一个很具代表性的例子。迄今,人们已经试制了多种微型钳。其驱动原理包括静电、热变形,以及压电元件等。也开发了内藏力传感器的产品。微型钳的开闭机构在被做得很小后,在装配方面会面临很大的困难,因此往往希望采用一次成型的加工方式。目前,通过硅的微加工工艺,已经成功地开发了微型钳^[46,47]。

2.3.3 非接触式操作

像微生物那样大小仅仅数微米的生物,在观察与操作的过程中,外界的影响显然不可以忽视。另外,有时需要用玻璃片将液体中数微米大小的被观测对象覆盖起来稳定住,然后置于光学显微镜下进行观察,同时也可以起到密封和防止蒸发的作用。在这种空间封闭的场合,非接触式操作方法比较适合。下面就非接触式的操作事例做一些介绍。

1. 静电微操作

近年来,随着微加工技术的进步,微通道

(Micro Channel)、微电极的批量加工已经成为可能。这对于利用静电力操作微颗粒(细胞、微生物、DNA 分子、高分子、金属微颗粒等)来说特别有用。正像静电微驱动器因驱动器的微小型化给社会带来了强烈冲击一样,在需要操作微颗粒的领域,静电力也是备受关注的。利用静电实行微颗粒搬运、旋转、姿态控制时,需要有直流电场、交流电场、旋转电场和交换电场等。到目前为止,根据不同的目的,提出了各种各样产生电场的方法。按照电场随时间变化的情况,这些方法可以分类如下^[48]:

(1) 电场不随时间变化

- 利用电荷与电场相互作用所产生的库仑力
- 恒定电场电泳
- 利用电场中物体的极化电荷所产生的极化力
- 利用梯度力:介电泳
- 利用取向力:静电取向
- 利用珠串形成力:珠串形成

(2) 电场随时间变化

- 利用电荷与电场相互作用所产生的库仑力
- 非恒定电场电泳
- 利用在操作对象周围旋转的涡旋电场电荷旋转(electro-rotation)
- 利用在操作对象周边移动的行波电场行波驱动(traveling-wave)

图 2.20 描述了各种情况的原理图。

在 19 世纪的后半期就已经开始了有关电泳的实验。最近,毛细管电泳已经应用在离子物质及高分子的分离工作中^[49~51]。毛细管电泳是对细长玻璃管中的电解质溶液施加强电场,从而实施筛选分离操作。筛选分离的原理是利用各个微粒移动速度不同的特性。这样,为了准确分离微粒,必须搬运的距离远比被分离微粒的大小要长得多。因此,电极之间的距离自然就应该设置得很长,并需要施加高电压以形成强电场。当然,操作对象应该限于那些在强电场作用下不会出现问题离子物质或高分子物质。近年来,微系统技术被应用到毛细管制作和芯片化中,引起了强烈的反响。以微芯片为例,向长度为 900mm 的分离通道施加 1500V/cm 的强电场

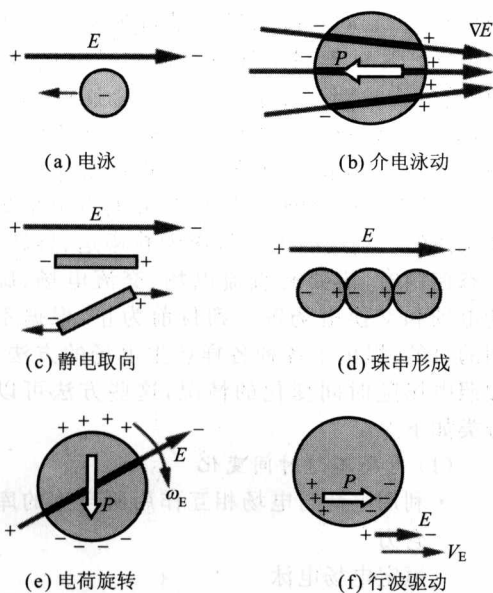


图 2.20 静电中微颗粒的运动控制分类

后,在 150ms 以内就完成了分离^[49]。要在这样的微流体回路内控制和测量微颗粒的运动,甚至复杂的反应,微系统技术是不可缺少的。特别是在最近,这种技术已经应用在 DNA 的遗传基因解析上,用芯片进行 DNA 的选别和解析的研究已经非常盛行。据有关研究的报道,利用微加工技术,将毛细管排列成阵列,可以提高分析的速度^[51]。进行 DNA 分子选别应用凝胶电泳法。让 DNA 在凝胶体网格中进行电泳,泳动速度取决于 DNA 的相对分子质量,据此能够实现分离。不过据说,在恒定电场凝胶电泳法的条件下,凝胶电泳所能够分离的 DNA,最多只能达到 30kbp 左右。因此,为了分离更多分子质量的 DNA,建议采用时变电场的非恒定电场凝胶电泳法,据研究人员称该方法可以分离数 Mbp 以上分子质量的 DNA^[52]。

为了实现高速、高精度的分离,毛细管电泳在原理上应该加大电极之间的距离和加强电场。对于细胞或微生物之类的生物,这样做有时可能会发生问题,而且随着电极之间距离的加大电压应该随之上升。为了解决这些问题,有人想出了交流电场的介电泳动或按一定时间高速切换电场的方法。关于交流电场的详细方法可以参见文献[53]~[55]。它的优点是容易发生电极反应或电浸透流,而且操作生物体对象时产生的破坏力较

小。到目前为止,人们已经利用交流电场对细胞、微生物、微颗粒、DNA 分子、胶体进行了操作,操作对象的大小在 $100\mu\text{m}\sim 10\text{nm}$ 之间。

介电泳是指由梯度电场中产生的粒子运动现象。在介电泳中,即使逆置电场的方向,粒子运动方向也不会发生改变。因此,为了防止电极反应,一般都采用交流电场。介电泳是由极化电荷与电场之间的相互作用而引起的,与作用在电场中带电电荷的电泳原理不同。在 20 世纪初就已经证实了极化粒子的运动现象,出现了各种实验与理论。对于液体中存在的半径为 a 的均匀球面体而言,电场强度为 E 、角速度为 ω 的涡旋电场所产生的介电泳动力 F 的大小可由下式确定:

$$F = 2\pi\epsilon_s a^3 \text{Re}[K(\omega)] \nabla(E^2) \quad (2.5)$$

式中,

$$K(\omega) = \frac{k_p - k_s}{k_p + 2k_s} \quad (2.6)$$

$$k_p = \epsilon_p - \frac{j\sigma_p}{\omega} \quad (2.7)$$

$$k_s = \epsilon_s - \frac{j\sigma_s}{\omega} \quad (2.8)$$

式中, σ_p 、 σ_s 分别表示球面体与介质的电导率 (S/m); j 为虚部, Re 为实部。

介电泳可以发生在空气、真空、液体中,特别适合微小物体的操作,迄今为止已经有多种应用。近年来,在硅或玻璃基板上制作微电极的技术变得容易了,因此有可能缩短电极的间隔,并在较低电压下获得强电场。由于操作对象尺寸小,其质量与代表长度的 3 次方成比例减少,因此在较弱的电场中也能进行迁移。介电泳对操作细胞等非常有利,可以在大大低于细胞融合电场的条件下实现迁移。例如,原生质体细胞融合需要 750V/cm 的直流电压脉冲,而细胞操作所需的电场每厘米达到数百伏就够了。小型化还有抑制热量影响的长处。操作对象变小后,其表面积效应却变大,致使它的放热特性得到改善。正如式(2.5)~式(2.8)所示,介电泳动力有正介电泳动和负介电泳动之分,前者沿电场梯度高的方向移动,后者正好相反。特别需要指出的是,两种介电泳动的取向取决于频率和液体介质的电导率。在生物高分子的操作中,从温度上升的角度来看,希望出

现沿电场梯度低的方向产生作用力的负介电泳动力。这种取向可以通过调整频率和液体介质的电导率来实现。

电场的时间变化特性也会引起粒子的运动。例如,如果让包围粒子的电场在粒子周围旋转,在粒子中将引发双极子。相对于外部电场的周期性变化的相位,双极子周期性变化的相位时而滞后时而超前,从而产生作用于粒子的旋转力矩。这被称为电荷旋转(electro-rotation)。同样的道理,用行波电场在粒子的附近进行扫描,可以沿着扫描方向搬运粒子。这种电场的时间变化引起粒子旋转或运动的现象是由极化电荷与电场的相互作用而产生的,它可以从静电微驱动器的驱动原理中得到解释。

把微电极置于空间中,从三维方向控制旋转电场,根据电荷的旋转原理能够使微粒进行旋转,并能使之获得任意姿态^[36,53]。处于绝缘体溶液中的介电体在电场作用下将产生介电极化,不过这个变化滞后于电场的旋转速度,因此利用两者的相互作用,能够产生影响对象物的力矩。此时,旋转速度可以通过交流电压的频率和电压进行调节。对于置于溶液中的半径为 a 的均匀球面体,由电场强度为 E 、角速度为 ω 的涡旋电场所产生的力矩 L 的大小如下式所示^[53]:

$$L = 12\pi\epsilon_0\epsilon_s a^3 E^2 \cdot \frac{(\epsilon_s\sigma_p - \epsilon_p\sigma_s)(\omega/\omega_c)}{(\epsilon_p + 2\epsilon_s)(\sigma_p + 2\sigma_s)(1 + (\omega/\omega_c)^2)} \quad (2.9)$$

式中, σ_p 、 σ_s 分别为球面体与介质的电导率; ϵ_p 、 ϵ_s 分别为球面体与介质的介电常数; ϵ_0 为真空的介电常数。

而且有

$$\omega_c = \frac{\sigma_p + 2\sigma_s}{\epsilon_0(\epsilon_p + 2\epsilon_s)} \quad (2.10)$$

在操作绿藻(直径为 $10 \sim 15 \mu\text{m}$)的实验中,旋转速度与施加的电压的平方成比例^[35]。在实验中,立体放置 6 个电极,分别通过 90° 相位差的正弦电压,发现置于电极之间的细胞发生纵向或横向的旋转,而旋转方向取决于电极的组合方式。

交流电场下的介电泳、电荷旋转、行波驱动这三者对粒子所产生的作用力和力矩的大小随频率将发生很大的变化。目前,主要

应用的频率带宽集中在 $10\text{kHz} \sim 10\text{MHz}$ 。关于静电的操作方法的报告很多,其详细情况及应用实例请参见文献[48]。

2. 激光微操作

理论及实验均证实,光照射到物体上会产生力,据说由 1mW 激光可以产生大约 $7 \times 10^{-12}\text{N}$ 的力。这与直径 $1\mu\text{m}$ 的硅微粒的重量约 $1 \times 10^{-14}\text{N}$ 或在水中以 $1\mu\text{m/s}$ 移动时产生的黏性力约 $1 \times 10^{-14}\text{N}$ 相比都是十分可观的。1970 年, A. Ashkin 发明了将激光送入显微镜的聚焦镜头进行集束照射从而捕捉微粒的方法。从那以后,就开始了以此光阱(trap)为基本原理的微粒操作方法的研究^[12~28]。

对于直径比光波长还要长的 Mie 粒子而言,光阱原理可以根据几何光学近似从光的折射中加以说明^[13]。如果透明球形微粒的光折射率大于它周围液体媒介的折射率,那么在激光焦点附近,就能稳定地捕捉到微粒。反之,金属微粒或折射率较低的微粒,将产生一种使微粒远离激光焦点方向的作用力,因此若不采取措施使激光的力学势能保持平衡,微粒就会被弹飞。

另外,对于比光波长短的 Rayleigh 粒子而言,微粒在光电场作用下将产生极化,所引起的双极子现象可以根据电磁场中的作用力加以说明。光产生于高速振动的电场和磁场中,如果将激光集束,振动电场就可能达到极大点,于是 Rayleigh 粒子被吸引到电场的极大点上。这时,若电场方向发生逆转,由于电场引起的双极子矩也将会反向,因此只要能跟踪该变化,电场和双极子矩就始终能够保持相同的取向。于是, Rayleigh 粒子被捕捉到集束焦点附近的电场。Svoboda 测量了直径 36nm 的金微粒和直径 38nm 的乳胶(聚苯乙烯)微粒处于光阱时的捕捉力,其结果表明该比值与极化率的比值几乎相等^[16]。

有关光阱的详细理论在不少文献(如文献[13],[16])中都有详细叙述,这里不再进行说明。根据以上原理,光阱可以捕捉数十微米到 25nm 的微粒,对象则是多种多样的,包括微粒(micro beads)、胶体粒子、细胞、微生物、细胞内的小器官、蛋白质集合体、DNA 分子(小滴状态)等^[19]。移动激光的焦点,就可以操作微粒。这种激光微操作(光镊)与机

械式微操作相比,具有以下优点:

① 是非接触式操作,即使在封闭环境下也有效。

② 用于观察的光学系统又担负着操作系统的任务,处于同一视野中的控制比较容易实现。

其中,优点①尤其重要,激光微操作对微芯片内的生物试样的操作也很有效。

光阱是作用于激光焦点位置或区域的力。众所周知^[14,15,17,20,21],利用光束扫描镜(galvano mirror)或 AOD(音响光学偏光镜)高速扫描一束激光,能够移动焦点位置,并以任意模式展开光阱场,捕捉多个微粒,然后将这些微粒排列成扫描模式。即使是激光发生干涉并形成斑马状条纹,也能使微粒按照条纹形状规则地排列。

通过激光高速扫描还能实现多个分离物体的光捕捉,甚至按合适的速度分别移动这些点,达到按照各自给定的轨道同时搬运这些物体的效果。这种方法被称为同步型激光微操作。为了保证操作对象能跟随着激光,对搬运的条件进行了实验研究^[22]。研究发现,直径为 $10\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微粒,能沿着给定的轨道进行稳定搬运的速度估计低于 $324.4/n(\mu\text{m}/\text{s})$ 。这里的 n 为搬运对象的数量。实际上, $n=2$ 时的实验结果表明,速度为 $160\mu\text{m}/\text{s}$ 时可以控制轨道。该实验的激光为 ND:YVO₄ 激光(最大输出功率 4.98W、波长 1064nm、模式 TEM₀₀),物镜为油浸镜头(放大倍数为 100 倍、数值孔径为 $1.35\mu\text{m}$)。

文献[23]介绍了将一束激光分割为多束并分别进行控制的方法。

利用激光非接触操作微工具间接操作被控制对象的方法称为间接激光微操作^[32],它可以应用于需要避免激光直接照射物体的场合以及在封闭空间里利用功能化微工具的情况。图 2.21 给出微工具的分类^[24,25]。搬运的方法则有工具推动、吸附于工具上、封闭在工具内等。我们以图 2.22 为例来说明激光扫描捕捉微粒(直径 $10\mu\text{m}$ 、聚苯乙烯制)并搬运酵母菌的原理。如图 2.22 所示,若能精确操作微工具,那么就能转动酵母菌,控制它的姿态^[56]。

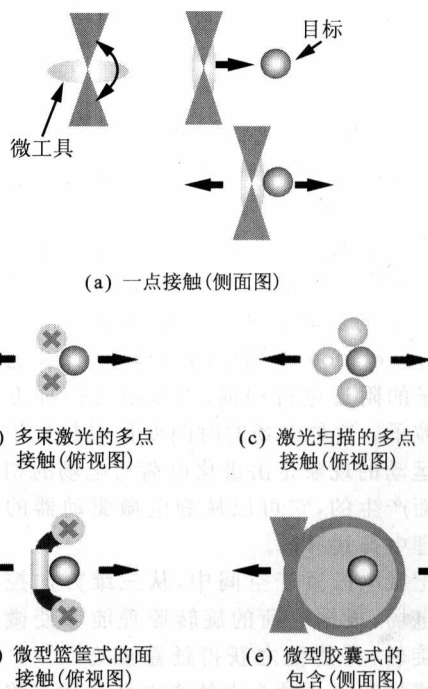


图 2.21 按微工具定义的间接激光微操作分类

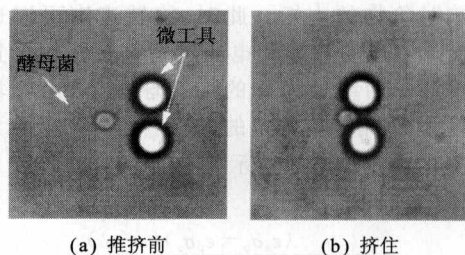


图 2.22 利用微工具进行酵母菌操作(名古屋大学)

施加于被光阱捕捉的微粒上的光阱力能够以亚 pN 的精度被测量出来。作用力检测方法^[16,17]包括:施加外力使光阱偏离的方法、由斯托克斯(Stokes)黏性力换算的方法、测量布朗运动后由热量换算的方法、由光捕捉微粒能量谱计算的方法、从单位响应计算的方法等。这些方法各有特点。另外,也有关于通过双向控制改善操作性能及自动化的实例报告。还有根据激光的焦点位置与被光阱捕捉的微粒中心的偏离量,计算光阱力,构建力反馈型双向控制系统的方法的报告^[28]。

必须指出,光阱操作抵御外界干扰的能力比较弱,因此其操作环境的建立很重要。

另外,也有关于微流体系统的压力和流量的实时测量与控制的研究报告^[27]。

3. 非接触式操作的应用

对微生物或 DNA 这样的数微米以下的操作对象,可以借助于微细加工技术制作一个微流体系统,再发挥静电场或激光操作允许对封闭空间施加作用的优势,就能够达到快速实施分离操作的效果。下面介绍非接触式操作的实例。

为了达到有选择、高速、高纯度地分离数微米大小微生物的目的,人们开展了有关高通量筛选系统的研究^[25~28]。这些研究的操作对象都非常小,大多数在数微米的量级。对这样大小的物体,显微镜的放大倍数至少需要在 100 倍以上,结果导致在光轴方向的观察很困难,还容易受外界的干扰。例如,溶液被蒸发,或者压力稍微有点变动,都会导致不规则流动。热对流也会成为问题。在亚微米级的尺度范围内,布朗运动已经不允许被忽略。因此,人们必须极力抑制操作空间的环境变动。

上述理由促使人们开始尝试在微加工成形的通道内,利用光阱(对 Mie 粒子起到光点的作用)、流体作用力(在流路的断面起到面的作用)、介电泳动力(依赖于电场梯度的场作用)等的选择和组合开展非接触式操作的研究。在该系统中,借助作用于场的介电泳动力,除去障碍物,用光阱直接或间接地捕捉锁定的操作对象,随着流体的流动沿着微细通路搬运操作对象。图 2.23 给出分离芯片随机提取微生物的概念。这种概念与传统细胞分离器(细胞分析装置)中典型的连续分离系统完全不同,它是一个在显微镜下随机且可选择地提取分散状微小物体的系统。分离芯片的基板为玻璃,经蚀刻加工后制成宽 $120\mu\text{m}$ 、深 $50\mu\text{m}$ 的微通道。在显微镜下观察到,这种方法能够在约 10s 时间里将一个分散在水中的酵母菌(直径约为 $5\mu\text{m}$)的目标菌体分离出来^[27]。由于酵母菌的折射率大于介质(水),因此投射到酵母菌的光子所产生的辐射压力的合力能朝着激光焦点方向稳定地捕捉酵母菌。移动激光焦点位置,允许在 $80\mu\text{m/s}$ 左右的速度下进行操作。本例所利用的激光为半导体激光(输出功率 200mW、

波长 832nm),物镜采用油浸镜头(放大倍数为 100 倍、数值孔径 $1.35\mu\text{m}$)。

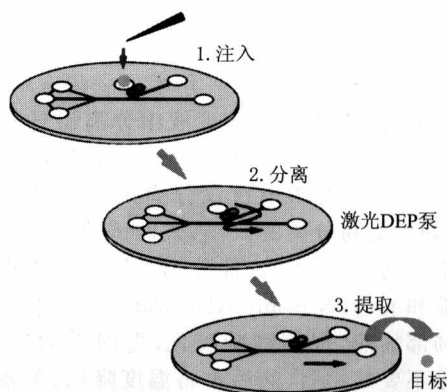


图 2.23 分离芯片提取微生物的概念

激光捕捉力依赖于激光强度,但若激光强度过大,则会带来损害操作对象的问题。有人针对以往将不同强度和波长的激光照射到每种微生物后造成的损伤情况进行了统计^[37]。研究表明,微生物不同,安全照射激光的强度和波长也不同,因此能否应用于未知微生物是不得而知的。为了解决这个问题,有人提出采用光捕捉微工具进行间接激光微操作的方法^[25]。

微工具的大小与需要搬运的微生物的大小基本相同。微工具必须可靠地投入到实际所需的位置,但由于其尺寸小,实现起来并不简单。如果能够批量、简单、廉价地购入或制作微工具,那么就能将其与试样溶液混合后投入环境中。但是,大量准备形状复杂或功能特殊的微工具,相当花费成本,因此应该避免才对。总之,人们期待能够高效地投入使用现场的技术。微工具的投入方法分类如下^[58]:

- ① 外部投入方式,从外部投入工具。
- ② 内部构建方式,在内部组装部件。
- ③ 内部制作方式,在内部制作工具。
- ④ 内部设置方式,在内部固定工具,然后进行剥离。

上述各种方式各有优、缺点,应该根据所需要微工具的形状或功能进行合适的选择。以内部设置方式为例^[58],在存放微工具的芯片上,直径 $10\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微粒在电场和液体桥接力的作用下,大多都能通过自我组织

进行排列,并通过界面活性剂的溶解自动将微工具投入指定的局部位置。投入后的微工具,能在介电泳动力的作用下进行浮游,以防止其与底面黏附。

至此,我们围绕光阱介绍了一些方法,以便高效、快速地从样本溶液中分离出任意微生物。例如,有一种超难度的分离工作,要从1000个母本集团中仅仅分离出1个微生物来,为了提高分离的效率,人们试验了两种完全不同的方法^[59,60]。即分别对甲基纤维素水溶液和 poly(N-isopropylacrylamide) 水溶液进行局部加热,促使其凝胶化,先固定微生物,去除不要的物质,然后再将温度降低,重新使其溶胶化,最终达到分离的目的。结果发现,甲基纤维素在 25℃ 左右的室温下出现溶胶化,但是将其加热到 40~50℃ 后,由于黏性增大导致凝胶化,从而使其从水溶性变化到不溶性(热胶凝现象)。它从低温升到高温过程中黏度的变化与从高温降低到低温过程中的黏度变化不同,具有滞后性。巧妙利用这些特性,有人研究出通过固定和孤立所要回收的对象微生物达到分离目的的系统^[59,60]。

新井史人

2.4 微机器人系统

正因为尺寸微小,人们才对微机器人的应用寄予厚望。通常,机构的微小型化主要是借助于精密加工实现的,不过基于 MEMS 工艺的小型传感器也发挥了很重要的作用。LED 芯片化以后甚至能集成到编码器中,提高了机器人的性能。

人们开发微机器人或将其实用化的时候,面临尺度效应和能量的问题。以轮式移动机器人为例,当车轮直径为 $1/n$ 时,车轮转一圈的移动距离也变为 $1/n$ 。

进行微小化后,虽然在电机提速和机器人减重后力矩变小,单位时间的移动量并不简单地就是 $1/n$,但若以同样的移动距离为前提,很显然,必须让车轮转动 n 倍。

至于电池,一般来说它的容量取决于自身的体积,因此电池微小化后其容量将急剧减少。其结果是,如果继续驱动电机这种消耗大量电流的设备,那么机器人驱动维持的时间将受到极大的限制。

为了解决这个问题,有人提出了从外部

供应能量的方法。但是这样做既与供应方法有关,又与供应能量的场地相关,机器人的工作空间也会受到限制。

由此可知,将传统的有关机器人应用的概念原封不动地照搬到微机器人上是不可取的。重要的是应该首先设定一些适合微机器人的应用目标,再按照目标开发相应的微机器人。

目前,人们所期待的、有实用意义的应用领域是医疗领域。尽管正在开发中的装置还处于仅仅应用了微机械技术的水平上,还算不上真正意义上的机器人,但它已经具有了较高的性能。

在本节中,主要介绍一些正在研究的医疗微机械、微工厂等,包括管内移动机器人、微动机器人、以微机械形式被实际应用的微导管等。

2.4.1 管内移动机器人

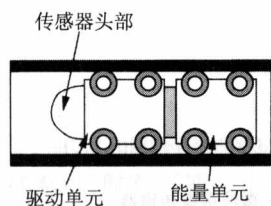
为了检查和维修核电站、化学工厂等的冷却水管道内部,管内移动机器人的研究得到发展。一开始,主要研究的对象是在直径数英寸大小的管道中作业的管内移动机器人,后来,管内移动机器人在核电站等有許多长距离冷却水系统的管道中工作的重要性越来越急迫,因此也开展了在细管道中作业的管内移动机器人的研究。

管内移动机器人多数是借助于管壁来进行移动,也有一些能在管道内的流体中游动。在流体中游动的机器人不仅可以考虑应用于管道中,还可能工作在血管等生物体内。

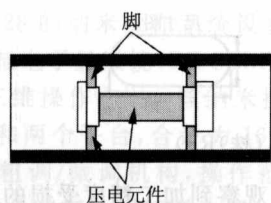
图 2.24 给出几种具有代表性的管内移动机器人的移动机构^[1~3]。

管内移动机器人面临的主要问题是能量供应问题。一般来说,它们不仅要求能长距离移动,而且必须具备在弯曲、扭曲的管道内移动的能力。在这种情况下,后边拖带一条提供能量的电缆是不方便的。另外,内置电源的工作时间有限,对于在管道内进行长距离移动的管内移动机器人而言,也不是十分合适。

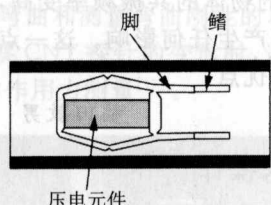
为此,人们开展了不少有关能量供应方法的研究,例如,将超磁致伸缩驱动器作为移动机构,利用管道外部的磁场提供能量的方法,以及借助于微波以非接触式方式供应能量的方法等。



(a) 轮式管内移动机器人



(b) 蠕动式管内移动机器人



(c) 泳式管内移动机器人

图 2.24 管内移动机器人

2.4.2 微机器人

微机器人是带有控制器、传感器、执行器,大小只有数厘米左右的自主移动机器人。举一个典型的例子,如 Khepera^[4],它已经被商业化,并被当作机器人智能的研究平台得到应用。

如图 2.25 所示,微机器人由控制器、通信单元、环境识别传感器、移动执行器、电池等组成。由于各个单元的小型化,装配就成为开发中的一个问题。

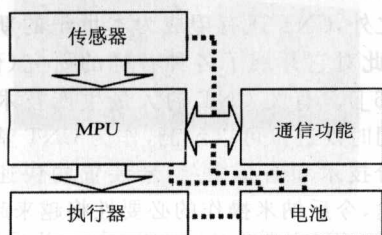


图 2.25 微机器人的基本结构

数毫米直径微小型电机的实用化、以 PIC 为代表的单片机 MPU 的普及、小型传感器的数字化等技术的发展,为开发小型、功能强大

的微机器人提供了条件。

微机器人由于形体小,对作业空间的适应性强,能够很轻易地钻入机器与墙壁之间这样的缝隙中。所以,人们对微机器人所期待的不是单个使用而是一群微机器人组成网络,来从事设备维护之类的工作。

在其实用化过程中,还面临能源和通信等问题。如果将电池内置在机器人中,那么它只能工作几十分钟,作业的范围显然受到限制,而且远距离的通信需要较大的功率。毋庸置疑,通信与能源都是微机器人的大问题。

武田等提出的解决方法是将机器人的活动场所改造为能源供给基地,以实现能源的供给。另外,也有人在开展借助于热电元件通过光效应实现能源供给的研究^[6]。

在通信手段方面,主流是光通信,但是光通信也存在诸如与环境识别传感器的干涉、多机器人彼此之间的干涉等问题。

2.4.3 医疗用微机械

微机械在医疗上的应用主要包括微导管、内视镜等医疗工具的开发,以及在遗传基因分析领域中应用的具有代表性的,如微全分析系统 μ TAS (micro total analysis systems) 等。自 20 世纪 90 年代初期开始,以美国为中心开展了一系列关于微导管的研究,主要是在导管前端安装各种各样的执行器。日本也进行了同样的开发,只不过是重点不同。美国主要是以工具为中心,而日本主要围绕血流传感器等传感设备开展研究。随着相关技术的进步,以前主要针对心血管治疗的导管技术已经开始推广到脑血管治疗,并且在微创治疗中得到普及。目前,在日本实用且具有代表性的微导管主要包括气囊导管、动静脉分流接管等。

在胃镜等体内观察摄像头领域,人们已经开发出医生能够就近操作的内窥镜,它不仅能够观察特定部位,还能完成体内组织的采集作业^[7]。还开发出了如图 2.26 所示的胶囊状体内观察摄像头,它不仅能观察胃部,还能观察肠道,因此备受期待。这种胶囊型体内观察摄像头里集成了微型摄像头、发射机、电池。由口腔吞入后,胶囊经过食道、胃、各个肠道时一路拍摄下相应的照片^[8]。

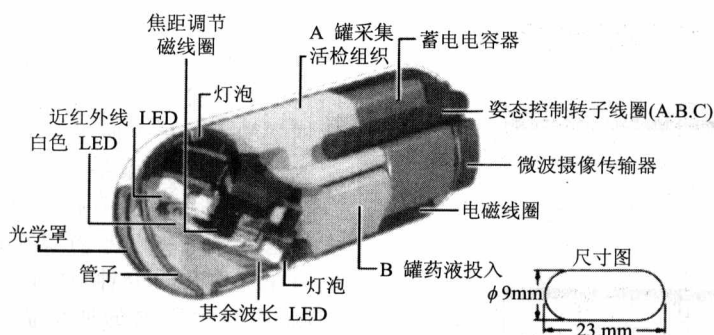


图 2.26 胶囊状内窥镜(NORIKA 3, (株)RF)

2.4.4 微工厂

如图 2.27 所示,人们设想在微工厂里将加工、组装等工序集成在一起,形成一个综合应用平台^[9]。

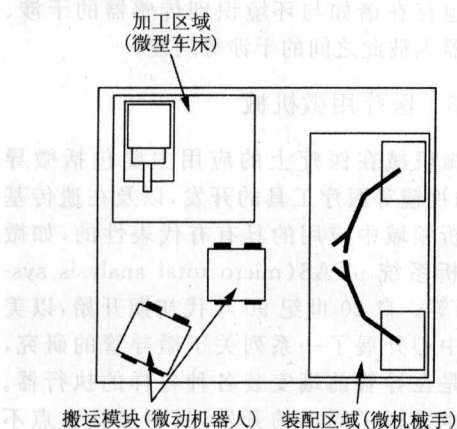


图 2.27 微工厂概念图

微型机器人全部由微型零部件组成,加工这些零部件的设备的行程小、精度高。传统的加工设备则相反,行程往往比需要的要大得多,存在很大的浪费。

因此,微工厂要通过加工设备自身的微型化和从加工到装配的紧凑化实现省空间、省能源和高效率。

微工厂由微型车床等加工设备、搬运设备、组装设备构成。迄今为止,已发表了关于微型车床开发实例的报道^[10]。

在车床微型化的时候,有人一度担心,由于没有有效的轴承,加工时可能会发生被加工对象晃动或振动等问题。其结果是因为加工对象自身变小以后,其惯性矩也变小,实

际上并没有观察到加工精度受损的现象。

也就是说,由于微小型化引起的尺度效应,质量小的物体的共振频率变高,从而在实用范围内不产生任何影响。这一点倒体现了微小型化的优点。

福田敏男 石原秀则

2.5 纳米操作

近年来,纳米尺度的测量与分析技术、材料加工技术在不断进步,有关新型纳米材料的研究开发十分活跃。与此同时,对操作纳米量级的微小物体的需求逐渐增多。到目前为止,利用扫描探针显微镜(以下简称为“SPM”)的探针进行二维操作的尝试已经开展得相当普遍了^[1~3]。早在 20 世纪 90 年代初期,IBM 的研究团队就实现了对原子的操作^[1]。近年来,紧随 SPM 探针的是纳米碳管(以下简称为“CNT”),用它主要进行了有关构筑电子电路方面的研究。CNT 发现于 1991 年^[4],其管径的尺寸可以小至大约几纳米,轴向长度约为几微米。由于极其微细,CNT 作为量子细线被寄予了很大的期望^[5]。除此之外,CNT 还有望成为本世纪的新型材料,因此对它开展了各种各样的研究(例如,文献[6])。有关 CNT 的大量生产技术研究也在同时推进。可以预测,作为 CNT 基本特性评价技术和新型微/纳米装置的快速原型等用途,今后纳米操作的必要性将越来越大。

SPM 纳米操作技术的不足是实时观察和操作比较困难,但是它的优点是如果将观察和操作分开,实施二维操作任务,那么观察图像的分辨率会很高。若采用原子力显微镜 (AFM),则可以在各种操作环境中进行操作。

如果要求观察和操作同步,此时往往选用电子显微镜。在扫描电子显微镜(SEM)的试样室里有多自由度机械手,能胜任各种三维纳米操作、加工和测量方面的研究^[7~14]。但是,应该注意,这时有可能会出现电子射线导致残留气体污染物等问题;反之,在SPM纳米操作中不会出现这些问题。

图2.28的纳米操作系统设置在一个场致发射扫描电子显微镜(FE-SEM)中,可以实现CNT三维操作^[9~11]。该纳米操作系统有两个探针和两个平台,合计为16个自由度。由于具有粗调/微调机构,操作范围为厘米级,而定位分辨率达到亚微米级。图2.29给出了该纳米操作系统将多层纳米碳管(MWNT)弯曲和测量弯曲刚性的场景。利用该系统观察CNT探针的变形时,还可以进行pN量级的作用力测量^[11]。

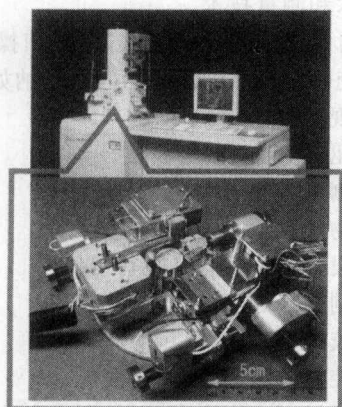


图 2.28 在电子显微镜内设置的三维纳米操作系统

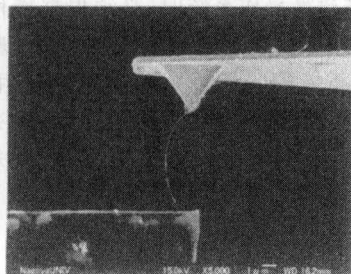


图 2.29 基于纳米操作系统的 MWNT 的弯曲试验(名古屋大学)

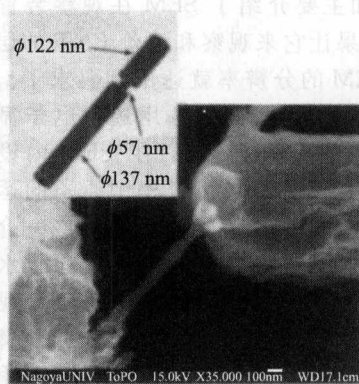
利用 CNT 探针尖端的电场放电作用,可以产生电子束诱导沉积(EBID)现象^[13]。如果将沉积用气体导入探针尖端附近,就有可

能制备出纳米结构或使纳米结构发生结合。例如,在电子显微镜的试样室内放入 $W(CO_6)$,那么在减压状态下它会气化成气体。

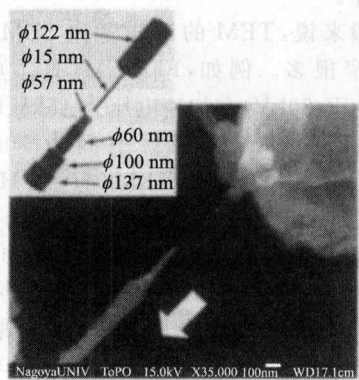
此时,通过用电子束照射气体,能将气体分解,并得到富含钨(W)的沉积物。如果将 CNT 用作电场放电发射器,会发现沉积物中钨所占的比例有大幅度提高^[14]。因此,这个方法能赋予被观察试料的某一个部分导电性能。如果能将 CNT 探针并列起来使用的话,那么 EBID 也能并列起来使用。

利用 EBID 实现的沉积物的结合强度很高,甚至可以应用在机械结合中。以两根 MWNT 结合为例,研究发现,EBID 结合的强度比范德华力结合的强度高出 7 倍以上^[11]。

若能有效地利用 EBID,不仅能对电气或机械的结合作业进行观察和操作,甚至是实时的。前面介绍的用于 pN 作用力测量的 CNT 探针,就是利用这个方法制作出来的。SPM 探针也可以同样制作出来。按图 2.30



(a) 破坏前



(b) 破坏后,从CNT内层抽出

图 2.30 纳米碳管的 Destructive Fabrication(名古屋大学)

所示,将 MWNT 的两端用 EBID 方式牢牢固定,然后朝相反方向拉伸,就能够将其一分为二,这样就能从内层抽出前端尖细的 CNT^[11~16]。这种破坏 MWNT 从其内部取出 CNT 的做法,称为 Destructive Fabrication。传统的由电弧放电制作出 CNT 后再经过精炼的方法,哪怕仅仅是从中抽取一根前端很细的 CNT,一般来说都是极其困难的;相反,上述方法实现起来则十分简单。

进一步调整施加在 CNT 探针上的电场,甚至还能够切断 CNT,制作出所希望长度的 CNT^[15]。

单层 CNT 的直径虽然只有几纳米大小,但是轴向破坏强度却非常高,因此其适用于制作加工用探针及测量用探针^[17]。例如,以 CNT 为结构材料的纳米夹持器已经被开发出来^[18]。有关 CNT 的操作和纳米装置的创新设计在文献[11]中有详细阐述,在这里就不再进行详细介绍。

上面主要介绍了 SEM 在观察装置中的应用,如果让它来观察和评价 CNT 的层变形情况,SEM 的分辨率就达不到要求了。为了提高观察分辨率,必须选用透射电子显微镜(TEM)。迄今为止,人们在 TEM 内设置了机械手,直接观察加工过程中原子的运动情况(文献[19],[20])。例如,文献[20]介绍了一个压电元件驱动,能实时改变原子水平上排列的装置,以及一个能同时、动态观察结构、力、导电性的系统。为了能操作悬臂梁和试样,系统包括 6 个自由度的平移运动和 2 个自由度的旋转运动,共计 8 个自由度的三维位置操作。

一般来说,TEM 的试样室比 SEM 的试样室狭窄很多。例如,FE-SEM(日本电子, JSM-6500F, 30kV)在加速电压为 15kV 时,分辨率为 1.5nm,试样观察空间为 70nm × 50mm × (3~40)mm。TEM(日立, H-800, 200 kV)的分辨率为点阵间隔 0.204nm,点间隔 0.45nm,试样观察空间为 2nm × 2mm × 0.3mm。由以上可以看出,在观察分辨率方面 TEM 高出 SEM 一个数量级,而在观察空间方面 SEM 的空间约高出 TEM 10 000 倍以上。因此,在 TEM 内操作的主要问题是机械手的操作空间小,自由度受到限制。为了解决这个问题,有人提出了在 SEM 和 TEM 之

间共享可动式试样平台的综合方法^[21]。通过合理分担作业任务,能够在一定程度上解决观察与操作空间以及自由度的问题。

如果能够有效利用 SEM、TEM 和 SPM,并巧妙地利用带有多个探针的三维纳米操作系统,那么将有可能扩大其应用领域。特别是在改善 TEM 内部操作性能时,扩大驱动系统作业范围、增加自由度、驱动机构的小型化占有十分重要的地位。当操作对象处于原子、分子水平的大小时,正如 2.3.2 节①中所说,分子间力等表面力将起到主导作用。另外,此时污染物及噪音的影响也不可忽视,应该根据不同目的构建相应的系统环境,如超真空、超低温环境等^[1]。纳米微操作的最终目的不仅仅是操作,还包括加工、装配、设备的创新设计、测量等多个方面,因此搭建一个纳米系统,不仅仅要考虑操作技术,还要考虑加工技术和测量技术。

针对 2.3 节、2.5 节介绍的微细操作,将搭建系统时主要应该考虑的问题归纳如下:

- ① 观察方法。
- ② 驱动方法。
- ③ 测量方法。
- ④ 物理现象与尺度效应。
- ⑤ 设计方法(结构、执行器等)。
- ⑥ 制作与加工方法。
- ⑦ 校准方法。
- ⑧ 控制方法,智能化方法。
- ⑨ 搬运、位置/姿态确定、固定方法。
- ⑩ 通信方法。
- ⑪ 人机接口。

在搭建微操作系统时,必须根据操作对象和目的的不同,合理地选择观察方法、观察形式、操作环境等。通过分析起支配作用的物理现象,往往可以达到改善系统特性的效果。

新井史人

参考文献

2.1 微驱动器, 2.2 微传感器

- [1] 五十嵐ほか: マイクロオプトメカトロニクスハンドブック, 朝倉書店 (1997)
- [2] 江刺ほか: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館 (1992)
- [3] 宝谷ほか: マイクロマシーン-賢く働く微小機械, 読売新聞社 (1991)

- [4] 原島ほか：マイクロ知能化運動システム，日刊工業新聞社（1991）
 - [5] 藤正ほか：マイクロマシン開発ノートブック，秀潤社（1991）
 - [6] 鈴木ほか：マイクロロボットのためのアクチュエータ技術，コロナ社（1998）
 - [7] 福田，光岡：夢のマイクロロボット，オーム社（1995）
 - [8] T. Fukuda and W. Menz : Micro Mechanical Systems, Elsevier (1998)
 - [9] 内野：圧電/電歪アクチュエータ，森北出版（1986）
 - [10] T. Fukuda et al. : Design and Dexterous Control of Micro Manipulator with 6 D. O. F., Proc. of IEEE Advanced Robotics (1991) pp.343-348
 - [11] T. Niino et al. : High-Power and High-Efficiency Electrostatic Actuator, Proc. 7th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1993) pp. 236-241
 - [12] W. C. Tang et al. : Electrostatic-comb drive of lateral polysilicon resonators, Sensors and Actuators, A 21-A 23 (1990) pp.328-331
 - [13] 武藤：アクチュエータの駆動と制御，コロナ社（1992）
 - [14] 堀ほか：微小歯車のワイヤ放電加工に関する研究，機論 C, Vol.60, No.579 (1994) pp.371-376
 - [15] 本間：形状記憶合金を利用したマイクロメカニズム，日本ロボット学会誌，Vol.8, No.4 (1990) pp.483-485
 - [16] 福田ほか：能動カテーテルシステムに関する研究（第1報，SMAを使った多自由度能動カテーテルの構造，実験結果と動作特性の評価），機論（C），Vol.60, No.573 (1994) pp.1727-1734
 - [17] 福田ほか：管内検査ロボットの研究（第4報，超磁歪素子を用いた微小管内移動マイクロロボットの機構と制御），機論（C），Vol.57, No.537 (1991) pp.1661-1666
 - [18] 林：微小走行機械，精密工学会誌，Vol.54, No.9 (1988) pp.1646-1650
 - [19] 山下ほか：ICPFを用いたEFDアクチュエータエレメントの開発と応用，ROBOMEC '96 (1996) pp. 1137-1140
 - [20] 郭ほか：能動カテーテルシステムに関する研究（多自由度カテーテルの構造，実験結果と動作特性の評価），日本ロボット学会誌，Vol.14, No.6 (1996) pp.820-835
 - [21] 服部ほか：光マイクログリッパの構造と動特性，機論（C），Vol.59, No.559 (1993) pp.799-806
 - [22] 中田ほか：光サーボシステムの基礎的研究（光アクチュエータへ寄与），機論（C），Vol.57, No.542 (1991) pp. 3228-3233
 - [23] H. Mizoguchi et al. : Design and Fabrication of Light Driven Micropump, Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1992)
 - [24] K. W. Yeh and R. S. Muller : Piezoelectric DMOS strain transducers, Appl. Phys., No.29 (1972) pp.521-522
 - [25] 榊原：ストレインゲージ型加速度計，センサ技術，Vol.7, No.4 (1987) pp.58-62
 - [26] 飯島：加速度センサの技術動向と需要動向，センサ技術，Vol.8, No.13 (1988) pp.80-84
- ### 2.3 微操作
- [1] 新井健生：マイクロ/ナノ作業，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，Vol.B (1995) pp.1494-1497
 - [2] 佐藤知正ほか：微細作業用マニピュレータの基本構成（自由度を共有・分散配置したマニピュレータ），日本ロボット学会学術講演会予稿集，No.2 (1992) pp.865-868
 - [3] 新井史人：微小世界の物理現象とマイクロマニピュレーション，日本ロボット学会誌，Vol.14, No.8 (1996) pp.1113-1116
 - [4] 新井史人：マイクロ・ナノマニピュレーション技術の将来展望，精密工学会誌，Vol.8, No.11 (2002) pp.1389-1392
 - [5] 新井健生：マイクロ・ナノマニピュレーション：今後の進展，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.2 (2002) pp.140-142
 - [6] T. Fukuda and F. Arai : Prototyping Design and Automation of Micro/nano Manipulation System, Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2000) pp.192-197
 - [7] 三輪敬之編：生命機械工学，裳華房（1992）pp.20-45
 - [8] 樋口俊郎，生田幸士編集：マイクロメカニカルシステム実用化技術総覧，フジ・テクノシステム（1992）pp.583-592（松島），pp.635-641（工藤）
 - [9] 福田敏男，藤吉基弘ほか：マイクロ・マニピュレータの制御（第4報，6自由度マイクロ・マニピュレータの試作と動作実験結果），日本機械学会論文集（C），Vol.56, No.532 (1990) pp.3287-3293
 - [10] 福田敏男，藤吉基弘ほか：マイクロ・マニピュレータの制御（第7報，6自由度静電型マイクロ・アクチュエータの動作原理と試作，動作実験結果），日本機械学会論文集（C），Vol.57, No.536 (1991) pp. 1296-1301
 - [11] T. Tanikawa and T. Arai : Development of a micro-manipulation system having a two-fingered micro-hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.15, No.1 (1999) pp.152-162
 - [12] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu : Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, Opt. Lett., Vol. 11 (1986) pp.288-290
 - [13] A. Ashkin : Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime, Biophysical Journal, Vol.61 (1992) pp.569-582
 - [14] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura and H. Masuhara : Pattern formation and flow control of fine particles by laser scanning micro-manipulation, Optics Letters, Vol.16, No.19 (1991) pp.1463-1465
 - [15] 増原：極微変換プロジェクト編：マイクロ化学，化学同人（1993）
 - [16] K. Svoboda and S. Block : Optical trapping of metallic Rayleigh particles, Optics Letters, Vol.19, No.13 (1994) pp.930-932
 - [17] K. Visscher, S. P. Gross and S. Block : Construction of multiple-beam optical traps with nanometer-

- resolution position sensing, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.2, No.4 (1996) pp.1066-1076
- [18] K. Morishima, F. Arai, T. Fukuda, H. Matsuura, and K. Yoshikawa : Screening of single Escherichia coli in a microchannel by electric field and laser tweezers, Analytica Chimica Acta, Vol.365, Issues 1-3 (1998) pp.273-278
- [19] S. Katsura, K. Hirano, Y. Matsuzawa, K. Yoshikawa and A. Mizuno : Direct laser trapping of single DNA molecules in the globular state, Nucleic Acids Res., Vol.26 (1998) pp.4943-4945
- [20] C. Mio and D. W. M. Marr : Optical trapping for the manipulation of colloidal particles, Adv. Mater., Vol.12, No.12 (2000) pp.917-920
- [21] A. Terray, J. Okakey and D. W. M. Marr : Microfluidic control using colloidal devices, Science, Vol.296 (2002) pp.1841-1844
- [22] F. Arai, K. Yoshikawa, T. Sakami and T. Fukuda : Synchronized laser micromanipulation of multiple targets along each trajectory by single laser, Applied Physics Letters, Vol.85, No.19 (2004) pp.4301-4303
- [23] E. R. Dufresne, G. C. Spalding, M. T. Dearing, S. A. Sheets and D. G. Grier : Computer-generated holographic optical tweezer arrays, Review of Scientific Instruments, Vol.72, No.3 (2001) pp.1810-1816
- [24] 新井史人ほか：選択的非接触マイクロ・ナノマニピュレーションに関する研究（レーザートラップと誘電泳動力の融合に関する考察），日本ロボット学会学術講演会（1999）pp.467-468
- [25] F. Arai, M. Ogawa, T. Fukuda et al. : High Speed Random Separation of Microobject in Microchip by Laser Manipulator and Dielectrophoresis, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2000) pp.727-732
- [26] F. Arai, A. Ichikawa et al. : High speed separation system of randomly suspended single living cells by laser trap and dielectrophoresis, Electrophoresis, Vol.22, No.2 (2001) pp.283-288
- [27] F. Arai et al. : Separation of target microbe by laser manipulation and flow control, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.2 (2002) pp.133-139
- [28] 新井史人, 小川昌伸, 福田敏男：バイラテラル制御による非接触マイクロマニピュレーション—レーザーマイクロマニピュレータによるマイクロツール制御—, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.4 (2002) pp.417-424
- [29] T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome and T. Fukuda : Acoustic Micromanipulation Using a Multi-Electrode Transducer, Proc. Int. Symp. on Micro Machine and Human Science (MHS) (1996) pp.163-170
- [30] H. A. Pohl : Dielectrophoresis, Cambridge University Press, Cambridge (1978) pp.1-579
- [31] G. Fuhr, R. Hagedorn, T. Mueller, B. Wagner and W. Benecke : Linear Motion of Dielectric Particles and Living Cells in Microfabricated Structures Induced by Traveling Electric Fields, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (1991) pp.259-264
- [32] M. Washizu : Manipulation of Biological Objects in Micromachined Structures, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (1992) pp.196-201
- [33] 福田敏男, 森島圭祐ほか：DNA分子の非接触マニピュレーションに関する研究（第1報，誘電泳動力によるDNA分子の搬送），日本機械学会論文集（C），Vol.62, No.599 (1996) pp.2765-2772
- [34] F. Arai et al. : Three-Dimensional Bio-Micro-manipulation under the Microscope, Proc. 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2001) pp.604-609
- [35] A. Kawaji, F. Arai and T. Fukuda : 3D Attitude Control System for Bio-micromanipulation, Proc. Int. Symp. on Micro Machine and Human Science (MHS) (2001) pp.197-202
- [36] 川地暁子, 新井史人, 福田敏男：3Dバイオマイクロマニピュレーション—バイオアライナによる微小物体の3次元姿勢制御，計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集（2001）pp.53-54
- [37] 物質・材料研究機構粒子アセンブル研究会編：粒子集積化技術の世界，工業調査会（2001）
- [38] N. Takeda, K. Umamoto, K. Yamaguchi and M. Fujita : A nanometre-sized hexahedral coordination capsule assembled from 24 components, Nature, Vol.398 (1999) pp.794-796
- [39] F. Arai, D. Andou et al. : Integrated micro-endeffector for micromanipulation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.3, No.1 (1998) pp.17-23
- [40] 川地暁子, 新井史人, 福田敏男：顕微作業のための接触型マイクロマニピュレーションのキャリブレーション，日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.68-74
- [41] A. Kawaji, F. Arai and T. Fukuda : 3D calibration for micro-manipulation with precise position measurement, J. of Micromechatronics, Vol.1, No. 2 (2001) pp.117-130
- [42] F. Arai, T. Sugiyama et al. : 3D Viewpoint Selection and Bilateral Control for Bio-Micromanipulation, Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2000) pp.947-952
- [43] T. Kaneko, N. Mitsumoto and N. Kawahara : A New Smart Vision System Using a Quick Response Dynamic Focusing Lens, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2000) pp.461-465
- [44] 谷本充隆, 新井史人ほか：低侵襲治療のためのマイクロ力覚センサに関する研究，日本機械学会論文集（C），Vol.64, No.620 (1998) pp.1266-1271
- [45] 新井史人, 元尾幸平ほか：マイクロピペット操作のための高感度マイクロ触覚センサ，日本機械学会論

- 文集 (C), Vol.70, No.699 (2004) pp.3199-3205
- [46] C. J. Kim, A. P. Pisano and R. S. Muller: Overhung Electrostatic Micro Gripper, *Transducers '91* (1991) pp.610-613
- [47] C. G. Keller and R. T. Howe: Hexsil Tweezers for Teleoperated Microassembly, *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (1997) pp.72-77
- [48] 新井史人: マイクロシステムの現状と静電気応用, *静電気学会誌*, Vol.23, No.4 (1999) pp.176-179
- [49] 馬場嘉信: キャピラリー電気泳動のマイクロチップ化, *CEアドバンス*, Vol.2, No.2 (1998) pp.10-16
- [50] C. H. Mastrangelo, M. A. Burns and D. T. Burke: Microfabricated Devices for Genetic Diagnostics, *Proc. IEEE, Special Issue: Integrated Sensors, Microactuators, & Microsystems (MEMS)*, IEEE (1998) pp.1769-1787
- [51] R. A. Mathies, P. C. Simpson and A. T. Woolley: DNA Analysis with Capillary Array Electrophoresis Microplates, *Proc. of the μ TAS'98 Workshop* (1998) pp.1-6
- [52] 増淵雄一, 小穴英廣, 松本充弘, 土井正男: 一次元パルスフィールドゲル電気泳動による長鎖DNA分離の機構, *日本機械学会第9回バイオエンジニアリング講演会講演論文集* (1997) pp.49-50
- [53] G. Fuhr, U. Zimmermann and S. G. Shirley: Chapter 5 Cell Motion in Time-Varying Fields: Principles and Potential, *Electromanipulation of Cells*, CRC Press (1996) pp.259-328
- [54] 鷲津正夫: バイオと静電技術, *静電気学会誌*, Vol.20, No.2 (1996) pp.87-91
- [55] 鷲津正夫: バイオテクノロジーへの応用, *静電気学会誌*, Vol.18, No.3 (1994) pp.238-239
- [56] 新井史人, 酒見敏弘ほか: マイクロチップを用いた微生物並列培養システムに関する研究 その1, レーザトラップによるマイクロツールを用いた微生物操作, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会* (2002) 1A1-I01 (1), (2)
- [57] H. Liang et al.: Wavelength dependence of cell cloning efficiency after optical trapping, *Biophysical Journal*, Vol.70 (1996) pp.1529-1533
- [58] F. Arai, H. Maruyama et al.: Pinpoint injection of microtools for minimally invasive micromanipulation of microbe by laser trap, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.8, No.1 (2003) pp.3-9
- [59] 新井史人, 市川明彦ほか: メチルセルロースの熱ゲル化を用いた微生物分離システムに関する研究, *日本ロボット学会学術講演会 02 (大阪大学)* (2002)
- [60] F. Arai, A. Ichikawa et al.: Isolation and extraction of target microbes using thermal sol-gel transformation, *Analyst*, Vol.128 (2003) pp.547-551
- 2.4 微机器人系统**
- [1] 高橋ほか: ミミズの運動を応用した細管内移動マイクロロボットの研究, *精密工学会誌*, Vol.61, No.1 (1995) pp.90-94
- [2] 田口ほか: ユニット型小口径管内走行検査ロボットの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.15, No.2 (1997) pp.230-235
- [3] T. Fukuda et al.: Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Robot in Water, *Proc. of IEEE Int'l Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94)* (1994) pp.273-278
- [4] AAI ジャパン社, <http://www.aai.co.jp>
- [5] 谷川編: マイクロマシン技術—産業技術研究開発制度におけるマイクロマシンプロジェクト—, *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.2 (2001) pp.1-45
- [6] 石原ほか: 分散型マイクロロボットに関する研究 (第3報, 非接触エネルギー供給システムを用いたマイクロ移動ロボットシステム), *機論 (C)*, Vol.60, No.571 (1994) pp.986-993
- [7] オリンパス株式会社, <http://www.olympus.co.jp>
- [8] 株式会社アールエフ, <http://www.rfnorika.com/index1.html>
- [9] 北原ほか: マイクロ旋盤の開発, *機械技術研究所報告* Vol.50, No.5 (1996)
- [10] 例えば, *International Workshop on Microfactories '98 (IWMF'98)*
- 2.5 納米操作**
- [1] D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, *Nature*, Vol.344 (1990) pp.524-526
- [2] J. A. Strosio and D. M. Eigler: Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope, *Science*, Vol.254, No.5036 (1991) pp.1319-1326
- [3] M. Sitti, S. Horiguchi and H. Hashimoto: Controlled pushing of nanoparticles: Modeling and experiments, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.5, No.2 (2000) pp.199-211
- [4] S. Iijima: Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol.354 (1991) pp.56-58
- [5] S. J. Tans, A. R. M. Verchueren and C. Dekker: Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube, *Nature*, Vol.393 (1998) pp.49-52
- [6] 田中一義編: カーボンナノチューブ, *化学同人* (2001)
- [7] H. Miyazaki and T. Sato: Fabrication of 3D Quantum Optical Devices by Pick-and-Place Forming, *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (1996) pp.318-324
- [8] M. F. Yu, M. J. Dyer, G. D. Skidmore et al.: Three-dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope, *Nanotechnology*, Vol.10 (1999) pp.244-252
- [9] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda: 3-D nanorobotic manipulation of nanometer-scale objects, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.13, No.2 (2001) pp.146-153
- [10] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda: 3D Nanorobotic Manipulations of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2001) pp.632-637
- [11] T. Fukuda, F. Arai and L. Dong: Assembly of nanodevices with carbon nanotubes through nanorobotic manipulations, *Proceedings of the IEEE*, Vol.91, No.11 (2003) pp.1803-1818
- [12] 中島正博, 新井史人ほか: カーボンナノチューブ

- ローブを用いた pico-Newton 力計測のための曲げ剛性の同定, 日本機械学会論文集 (C), Vol.70, No.690 (2004) pp.427-432
- [13] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda : Electron-beam-induced deposition with carbon nanotube emitters, *Applied Physics Letters*, Vol.81, No.10 (2002) pp. 1919-1921
- [14] F. Arai, P. Liu, L. Dong, M. Nakajima and T. Fukuda : Tungsten-Rich Deposits at Anode Using Carbon Nanotube Emitters, 2003 Int. Symp. on Micromechatronics and Human Science (2003) pp.205-210
- [15] F. Arai, P. Liu, L. Dong and T. Fukuda : Field Emission Property of Carbon Nanotube Probe and Its Applications, 平成 16 年電気学会全国大会, S 23 (第 3 分冊) (2004) pp.20-21
- [16] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda : Three-Dimensional Nanoassembly of Multi-Walled Carbon Nanotubes through Nanorobotic Manipulations by Using Electron-Beam-Induced Deposition, *Proc. of 2001 1st IEEE Conf. on Nanotechnology* (2001) pp.93-98
- [17] H. J. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert and R. E. Smalley : Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, Vol.384 (1996) pp.147-150
- [18] P. Kim and C. M. Lieber : Nanotube nanotweezers, *Science*, Vol.286 (1999) pp.2148-2150
- [19] T. Kizuka, K. Yamada, S. Deguchi, M. Naruse, and N. Tanaka : Cross-sectional time-resolved high-resolution transmission electron microscopy of atomic-scale contact and noncontact-type scanings on gold surfaces, *Phys. Rev. B*, Vol.55 (1997) pp.7398-7401
- [20] 木塚徳志 : ナノ構造操作の原子ダイナミックス, *応用物理*, Vol.71, No.8 (2002) pp.989-995
- [21] 中島正博, 新井史人ほか : 走査型及び透過型電子顕微鏡下でのハイブリッドナノマニピュレーションシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2004)
- [1] D. M. Eigler and E. K. Schweizer : Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, *Nature*, Vol.344 (1990) pp.524-526
- [2] J. A. Stroscio and D. M. Eigler : Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope, *Science*, Vol.254 (1991) pp.1319-1326
- [3] M. Saito, S. Horiguchi and H. Hashimoto : Controlled pushing of nanoparticles : Modeling and experimental, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 5, No.3 (2000) pp.199-211
- [4] S. Iijima : Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol.354 (1991) pp.56-58
- [5] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren and C. Dekker : Room temperature transport based on a single carbon nanotube, *Nature*, Vol.393 (1998) pp.49-52
- [6] 田中一義, 山本正太郎, 北平同久 (2001)
- [7] H. Mizusaki and T. Sato : Fabrication of 3D Quantum Optical Devices by Pick-and-Place for using Two-DEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (1996) pp.318-321
- [8] M. F. Yu, M. J. Peet, G. D. Stokich et al : Three dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope, *Nanotechnology*, Vol.10 (1999) pp.244-245
- [9] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda : 3D nanorobotic manipulation of nanometer-scale objects, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.13, No.2 (2001) pp.118-121
- [10] L. Dong, F. Arai and T. Fukuda : 3D Nanorobotic Manipulations of Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2000) pp.872-875
- [11] T. Fukuda, F. Arai and L. Dong : Manipulation of nanometer-scale objects with a scanning electron microscope, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.13, No.2 (2001) pp.118-121
- [12] 中島正博, 新井史人ほか : ナノマニピュレーションシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2004)
- [13] H. J. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert and R. E. Smalley : Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, Vol.384 (1996) pp.147-150
- [14] P. Kim and C. M. Lieber : Nanotube nanotweezers, *Science*, Vol.286 (1999) pp.2148-2150
- [15] T. Kizuka, K. Yamada, S. Deguchi, M. Naruse, and N. Tanaka : Cross-sectional time-resolved high-resolution transmission electron microscopy of atomic-scale contact and noncontact-type scanings on gold surfaces, *Phys. Rev. B*, Vol.55 (1997) pp.7398-7401
- [16] 木塚徳志 : ナノ構造操作の原子ダイナミックス, *応用物理*, Vol.71, No.8 (2002) pp.989-995
- [17] 中島正博, 新井史人ほか : 走査型及び透過型電子顕微鏡下でのハイブリッドナノマニピュレーションシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2004)
- [18] H. J. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert and R. E. Smalley : Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, Vol.384 (1996) pp.147-150
- [19] P. Kim and C. M. Lieber : Nanotube nanotweezers, *Science*, Vol.286 (1999) pp.2148-2150
- [20] T. Kizuka, K. Yamada, S. Deguchi, M. Naruse, and N. Tanaka : Cross-sectional time-resolved high-resolution transmission electron microscopy of atomic-scale contact and noncontact-type scanings on gold surfaces, *Phys. Rev. B*, Vol.55 (1997) pp.7398-7401
- [21] 木塚徳志 : ナノ構造操作の原子ダイナミックス, *応用物理*, Vol.71, No.8 (2002) pp.989-995
- [22] 中島正博, 新井史人ほか : 走査型及び透過型電子顕微鏡下でのハイブリッドナノマニピュレーションシステム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2004)

第3章 仿生机器人

到2015年,日本将进入一个“超高龄社会”。即四个人中就有一位65岁以上的老年人。人们随着年龄的增长,身体机能也明显下降。根据日本(财)厚生统计协会的调查报告《不同残疾种类的残疾人数推移情况》披露,患有视觉障碍、聋哑疾病、肢体残疾、内脏疾病等的残疾人数年年都在增长。另外,日本所拥有的生物技术、纳米技术、IT等先进技术越来越尖端。面临这种状况,“仿生机器人”正好是将两个方面有机结合在一起的载体,即依仗机器人学等尖端技术来修复或代偿身体机能低下的部位。从这个观点出发,本章将人体分为四肢(手、腿)、内脏、感觉器官(听觉、视觉),分别介绍有关修复或代偿这几部分的技术。特别是四肢,还将分为驱动四肢的肌肉和关节并逐一进行介绍。

首先来看四肢的修复与代偿技术,本章将讲述假腿、假臂的开发动向、存在问题和展望。关于脏器的修复与代偿技术,主要围绕最具代表性的内脏器官——人工心脏,对它的关键技术、系统评价方法、设备开发方向等进行讲解。有关的听力器官,本章将以内植式人工中耳为中心,阐明它的原理、构造和性能。至于视觉器官的修复技术,具体介绍如何借助于属于非视觉器官的所谓感官代偿器来实现视觉功能。在人工关节方面,进一步解说它应该具备的生物学、力学条件以及设计的方法。最后,针对人工肌肉,论述基于人造橡胶以及薄膜驱动器的优异性能的新型驱动机构。

池田喜一

3.1 假臂与假腿(四肢的修复)

最近,除了交通事故或工伤事故以外,随着高龄的增长,由于末梢循环障碍所导致的四肢截肢现象在不断增加。由于在残疾人中各自的残存运动功能以及身体活动能力大不相同,为了满足各种残疾人员的具体需要,开

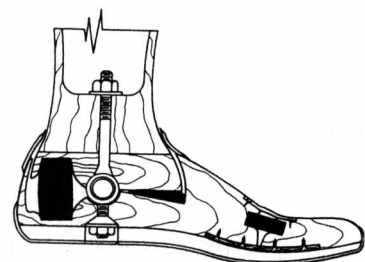
发、制作了具有高性能的各种假肢。下面,就最近的假肢状况以及今后的发展动向进行介绍。

3.1.1 假腿

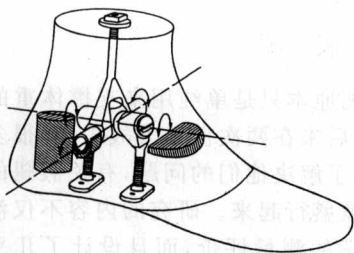
假腿原本只是单纯用来支撑体重的一个承载体,后来在两次世界大战中,有很多军人伤残,为了解决他们的问题,有关假腿的研究开发也就盛行起来。研究的内容不仅涉及步行运动学的测量评价,而且设计了几乎所有能够从机构学角度想到的机械原型机^[1]。例如,人工脚踝和足部,已经从单轴型改进成多轴型,甚至SACH(Solid Ankle Cushion Heel)型(图3.1)。对于人工膝关节,引入了载荷制动机构和连杆机构。载荷制动机构能在体重施加后,承受体重并固定膝关节轴。连杆机构的作用是将旋转中心提升到髌关节附近,以减小腿伸出时膝关节产生大的屈曲,并在脚碰到地时防止膝部屈曲(图3.2)。另外,还设计了将人工脚踝关节和人工膝关节联动的大腿假肢方案(图3.3)。

但是,仅依赖于机械结构的假腿,很难适当调节人工关节的功能以适应下肢截瘫者所面对的各种运动环境。以人工大腿下坡时的情形为例,为了防止脚碰着地时因膝关节急速屈曲而摔倒,在人工大腿中引入了制动机构。当该机构承受体重的时候,能围绕膝关节轴产生克服膝部屈曲的阻抗力矩。即便是这样,当体重施加到一定程度而制动力尚未起作用之前,膝关节必须处于伸展状态,截瘫者也必须围绕髌关节施加伸展力矩。

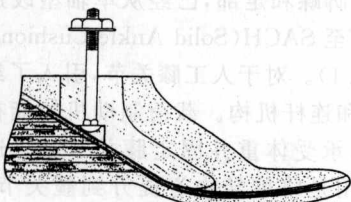
如果制动机构太灵敏,那么在脚尖离地从支撑相(是指脚与地面接触阶段)末期往摆动相(是指脚与地面分离阶段)的移动过程中,制动力的解除将变得不够充分,结果使膝关节不容易弯曲,无法实现自然流畅的步行。为了解决这个问题,必须采用具有控制机构的机电一体化技术。该控制机构能测量假腿



(a) 单轴型

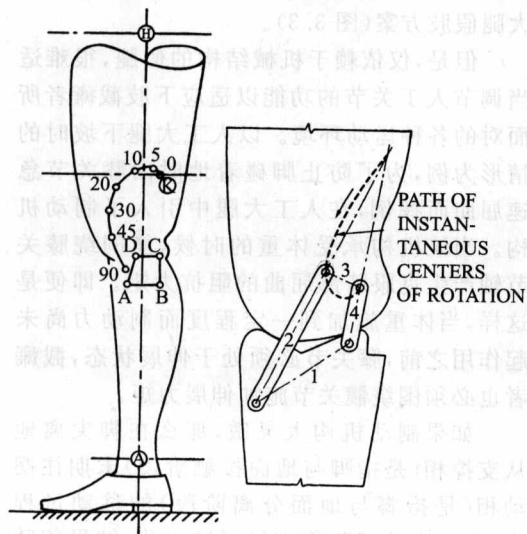


(b) 多轴型



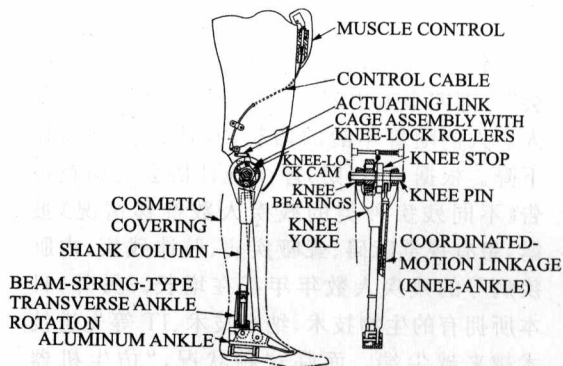
(c) SACH型

图 3.1 各种人工脚踝和足部

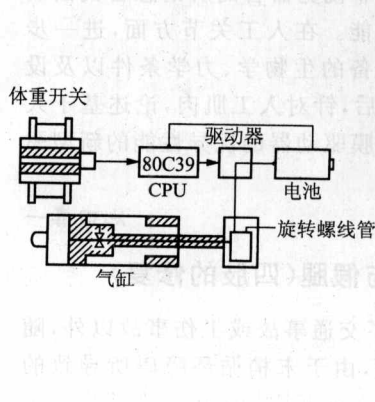
图 3.2 四连杆机构的人工膝关节^[1]

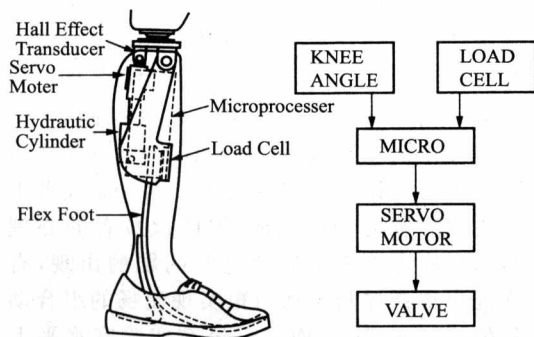
所处的步行状态,在必要的时候产生合适的

制动力。人们期待在这种机电一体化技术支持下,大腿截肢者的双腿能够一步一阶地交互下楼梯,及时地改变摆动相时的步行速度,靠人工大腿能单独、踏踏实实地完成膝关节屈曲和支撑体重等动作。

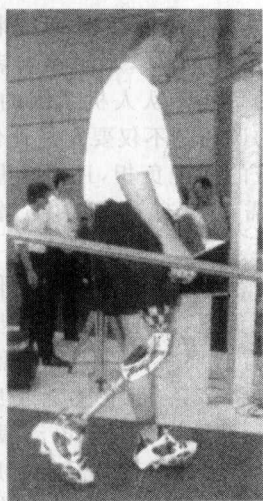
图 3.3 机械零件构成的人工踝关节和膝关节联动的 Catranis 大腿假肢^[1]

最初引入机电一体化技术的是智能假腿^[2](图 3.4)。该智能假腿由微机控制步进电机,调节气缸的阀开度,控制摆动相时人工膝关节的屈曲和伸展速度。该系统特别考虑了实际应用时不得不面对的节能问题,将系统连续使用时间延长至 6 个月以上。其后,又开发出了除摆动相外支撑相也能控制人工膝关节的假腿^[3],其中一部分还实现了产品化(C-leg(德国 OttoBock 公司))(图 3.5)^[4]。在假腿中安装有多个传感器,能够检测出假腿所处的状态,并进行适合当时状况的绕膝关节轴的最优力矩控制。另外,还开发了应用液压缸或功能性流体的人工膝关节(Adap-

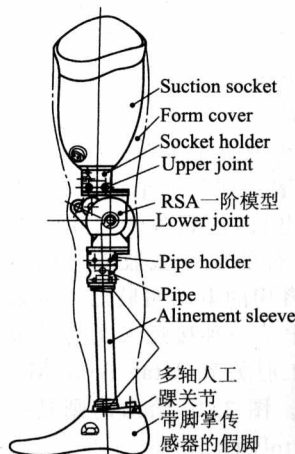
图 3.4 智能假腿^[2]

图 3.5 C-leg(德国 OttoBock 公司)^[3]

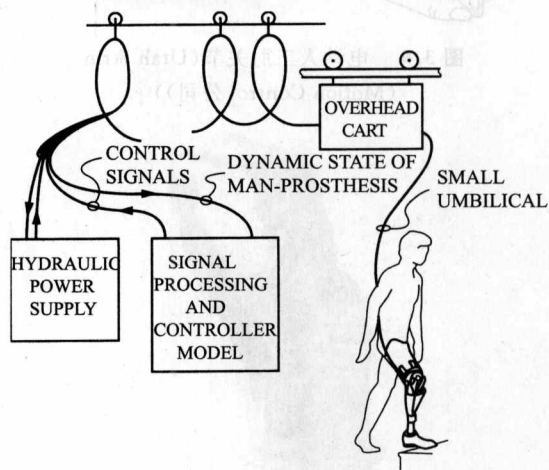
tive Knee(英国 Blatchford 公司,它离产品化只有一步之遥)、MR 流体控制人工膝关节(图 3.6)(德国 BiedertmannMotech 公司)等。此外,还开发了从外部获取动力能一步一步上下台阶的动力假腿^[5],该假肢应用的前提条件是有小型与轻量的动力源,由于尚未实现这一目标,故它还没有达到商品化(图 3.7)。

图 3.6 MR 流体控制人工膝关节
(德国 BiedertmannMotech 公司)

随着多种高性能假腿部件的开发和销售,摆在每一位下肢截瘫者面前的问题是挑选哪些部件装配成合适的假腿以及怎样进行调整。这些内容已经超出了传统假肢制备人员(PO)的教育课程及经验,因此制造商们有必要将系统支援(包括针对 PO 人员的教育培训课程在内)作为产品的一部分向用户提供。这样的支援系统应该包括定量掌握支撑相的稳定性和步行运动测量、评价的仪器,但更重要的问题则是必须明确当假腿功能改变时下

图 3.7 动力型假腿^[5]

肢截瘫者将变成怎样的步行状态,以便采取相应的措施。针对该问题,在 1977 年,MIT 的 W. Flowers 等进行了假腿步行模拟器的研究^[6~8]。该模拟器的对象是安装液压驱动人工膝关节和人工踝关节的截肢者,通过改变关节的功能、观察步行状态,尝试为截肢者调节出最佳的状态。不过该系统最终未能达到现场实用的水平(图 3.8)。

图 3.8 假腿的步行模拟^[6]

3.1.2 假臂

人们称手是脑的延伸,具有敏感的触觉和细致多样的动作,与下肢相比,它可实现高难度的复杂控制。因此,为了让假臂实现人手动态功能的模拟,需要解决包括与人体肌肉神经系统的接口在内的控制技术问

传统的假臂中有一种是装饰性的,更注重外观像人手;另一种是动力型的,用导线和金属丝来传递残存的肌肉力,或者代替肌肉力驱动手指的开合及人工肘关节、人工肩关节。不过最近,将电极内置于承接腔(socket)的内壁上,检测皮肤表面肌肉的电位变化,再经过控制电路驱动电机,达到各个人工关节屈曲/伸展或手指开合的前臂截肢者用的电动假肢和上臂截肢者用的电动假肢已经进入实用化。图 3.9 给出了一种接近人类肘关节动作速度的电动人工肘关节(Utah Arm(Motion Control 公司))。图 3.10 给出的则是一种手形电动假手(OttoBock 公司)。

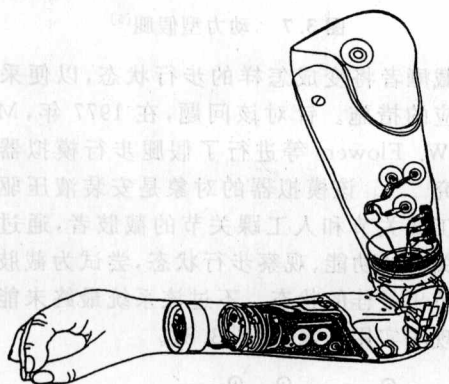


图 3.9 电动人工肘关节(Utah Arm
(Motion Control 公司))



图 3.10 手形电动假手(OttoBock 公司)

从最新的研究成果看,在手部硬件方面,将掌背屈、屈曲和五指独立屈曲、伸展机构集成于人手相仿大小体积的精巧电动假肢机构已经被商品化(原田电子 SH-I)。在软件控制方面,一种方式是检测出截肢端表面的肌电图,由人工神经网络识别截肢者的动作意图,

然后从手的掌背屈、屈曲、各根手指的屈曲等诸多动作中选择一个予以执行;还有一种方式有自学习功能,能对应于人体体能变化导致的肌电信号变动。虽然有这些控制软件,但是按什么顺序选择、驱动什么部位来执行一连串的动作等这些控制还必须由截肢者十分集中注意力才能完成,因此截肢者的心理负担比较大。为了避免这些问题的出现,有人提出选择控制驱动力矩实现流畅的组合作的控制方式^[10],而且已经在实验室水平上得到实现。

3.1.3 假腿与假臂的发展动向

可以预期,今后假肢将向高性能化进一步发展。因此,很有必要从包括截肢者在内的人机系统的角度去思考假肢功能。

截肢者的残存功能的特性极其多样化。即使是同一个人,其体能在一周之内,甚至同一天的起床到就寝之间,都是在不断变化的。因此,所谓提高假肢的性能,就是将假肢与截肢者的功能融为一体,不给截肢者增加身体或精神上的负担。从人机系统的观点出发,一个重要的课题是不仅要定量评价承担机械输出所必需的生理负担,还要定量评价控制假肢所必需的信息处理系统增加的心理负担。

人们当然希望在调节动作时假腿不会增加截肢者的负担,但是为了适应步行环境的急剧变化,有必要将截肢者的意愿传递给假肢或从假肢将信息(足底感觉或身体感觉的反馈)反馈给截肢者。对于电动假臂,则希望消除从运动神经以外的路径控制所导致的滞后或非随意性。另外,由于控制依赖于视觉反馈,在暗处不能使用,因此这样的系统对视觉障碍者来说自然无法接受。除了这些问题以外,还有必要将指尖的触觉、压觉、各个关节的运动知觉等反馈给人体。

目前,人体与假肢的连接部分主要依赖于覆盖在截肢断面的承接腔内,而截肢断面与承接腔内表面的力(压力、剪断力)分布和传热等拓扑学问题尚有待解决。由于截肢断面表层部位的力学特性随残疾人的身体状况差异很大,而且很容易受伤,这是妨碍假肢长时间使用的一个主要原因。为了能从本质上解决这个问题,1995 年有人提出在截肢断面

的骨骼中埋入金属支柱,并在贯穿皮肤表面的支柱前端连接假肢部件的所谓“骨直联方式”,目前该方式已经进入临床评价阶段。病例报告指出,假臂能长时间使用,不出问题;但是反复承受体重负荷的假腿曾经出现过骨组织和金属相结合后又分离的现象,因此必须继续解决与活体长时间保持亲和性的材料工程学方面的问题。

森本正治 中川昭夫

3.2 人工心脏

3.2.1 人工心脏技术的发展动向

1997年10月,日本发布实施了《脏器移植法》,于是从脑死供体进行心脏移植成为可能。但实际上,今后能够预计到的供体患者极少,因此挽救其他病患者就只剩下了人工心脏这一条路。恰好,2001年7月,美国又开始了植入全人工心脏的临床应用。原先的人工心脏多数属于气动式的,要在患者的床边放置控制装置(日本 Zeon 公司和东洋纺织)。近年来,在保留原有人体心脏的基础上,另外在腹部埋入辅助人工心脏的方法成为家庭医疗的一种新形式,并得到了应用。辅助人工心脏(Baxter 公司(图 3.11)、Thoratec 公司)由系在腰间皮带上的电池提供电力驱动,但是个头小的患者无法使用。从 1999 年开始,两种超小型轴流式辅助人工心脏(Micromed 公司、Jarvik Heart 公司),以及从 2001 年开始的搏动式植入全人工心脏(Abiomed 公司)都已经进入临床阶段。本节主要围绕若干已经在人工心脏领域付诸实用的、有创意的机构进行讨论。

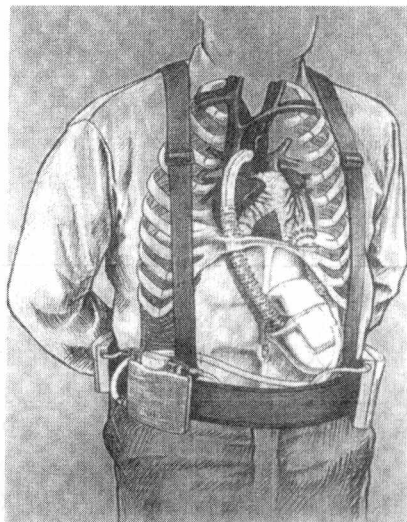


图 3.11 体内植入式搏动型辅助人工心脏
(Edwards Lifesciences 公司, Novacor)

3.2.2 人工心脏的性能要求

对于心脏病重症患者而言,选用像自然心脏活体一样的搏动式全人工心脏比较理想,但是对于非重症患者而言,留下自然心脏活体维持搏动,再借助于并列植入旋转式辅助人工心脏补充血流量的方法更为常见。血泵的形式如图 3.12 所示,分为由叶片产生旋转流动的涡轮式血泵、由相当于瓣膜的机构产生旋转的容积式血泵、带瓣膜的往复式血泵^[1]等。实际上,涡轮式血泵(特别是离心式和轴流式)以及容积式血泵(特别是滚子式)主要应用在手术期间的体外循环,而往复式血泵(特别是隔膜式或推板式)则主要应用在搏动式人工心脏中。

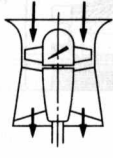
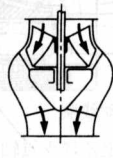
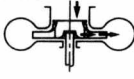


涡轮式血泵				
轴流式	斜流式	离心式	横流式	涡流式
				

图 3.12 人工心脏中所使用的各种血泵



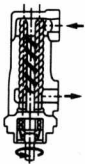
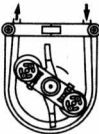
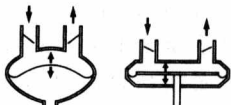
容积式血泵				往复式血泵
齿轮式	叶片式	螺杆式	滚子式	隔膜式、推板式等
				

图 3.12 人工心脏中所使用的各种血泵(续)

植入式人工心脏所要求的机械性能^[2]包括最大血流量 8l/min、左心室产生压力大于 100mmHg (1mmHg = $1.333\ 22 \times 10^2$ Pa, 下同)、右心室产生的压力大于 20mmHg。重点研发的课题则包括血液凝固和血球破坏的预防、小型化、两年以上的耐久性和安全性保证等。

3.2.3 人工心脏的血泵机构和单元技术

据说,目前用于体外循环的离心式血泵,主要由于叶轮轴周围发热和血液凝固的问题,其使用时间限制在 2~3d。因此,具有耐久性、血液相容性等方面优良性能的轴承、密封圈、驱动技术等都属于关键技术,以下按血泵机构分别予以介绍。

(1) 磁悬浮型(图 3.13) 应用真空泵的磁力轴承技术,使离心泵的盘状叶轮在 3 轴控制下完全悬浮,而且在流动过程中该形状不会产生沉淀。这种叶轮磁悬浮机构在长期耐久性方面有优势。这种机构在动物实验中已经有两年半不需要维护的生存成绩,已经接近临床应用的程度。

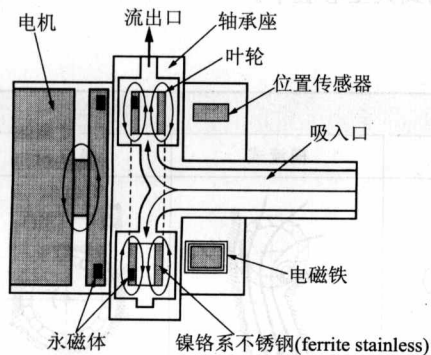


图 3.13 磁悬浮型离心血泵
(Terumo 公司, DuraHeart)^[3]

(2) 动压悬浮型(图 3.14) 仅依靠流体作用力支撑转子悬浮的动压轴承机构已经实际应用硬盘等方面了。人们对这项技术的长期耐久性也寄予了希望。有关的动物实验表明,采用基于衬垫型轴承支撑叶轮的形式后,血泵的寿命能支撑数周之久。

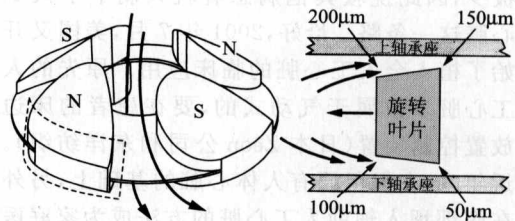


图 3.14 动压悬浮型离心血泵的叶轮
(VentrAssist 公司)^[4]

(3) 单点轴尖轴承型(图 3.15) 单靠永磁体以三维方式支撑物体是不可能的。但是若与轴尖轴承组合使用,则能形成单点支撑机构。叶轮的一端由相斥式永磁环支撑,而另一端由轴尖轴承来支撑。这种泵的动物实验一直在继续。

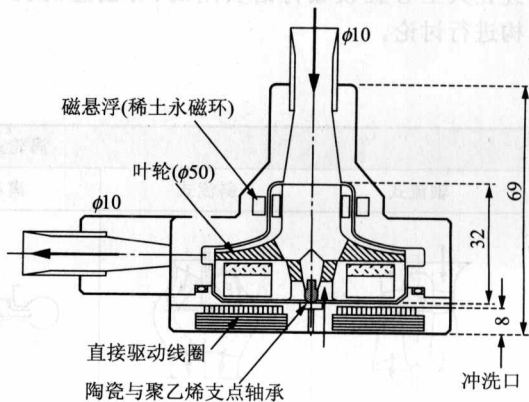


图 3.15 单点轴尖轴承型离心血泵
(产总研, DD9)^[5]

(4) 双点轴尖轴承型(图 3.16) 双点轴尖轴承型是指叶轮两端均由轴尖轴承支撑,形成双点轴尖轴承的方式。由于要尽量减小轴尖轴承的磨损,因此这种轴承采用了人工关节材料,由氧化铝陶瓷与超高分子聚乙烯材料配对构成。

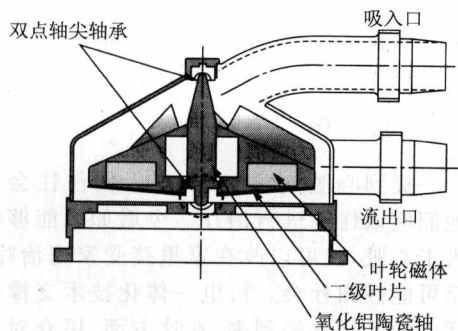


图 3.16 双点轴尖轴承型离心血泵
(美国 Baylor 医科大学, PI 700)^[6]

其他单元技术包括:

(1) 机械密封圈型(图 3.17) 让纯净水在离心泵的转轴与轴承之间进行循环,并通过耐磨机械密封圈实现与血液之间的隔离。人们对这样的离心泵反复进行了三个月的多次动物实验,离临床应用已经相当近。

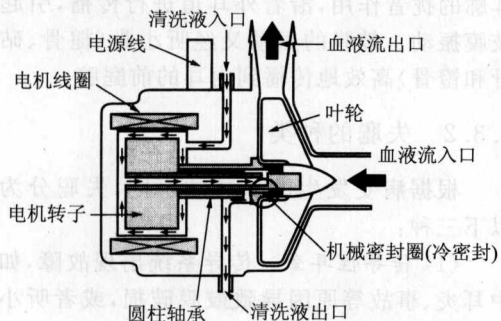


图 3.17 机械密封圈型离心血泵
(Sunmedical 技术研究所, EVAHEART)^[7]

(2) 磁流体密封圈型(图 3.18) 橡胶、高分子材料制成的轴承密封圈,无论如何都会导致摩擦增大、性能退化。如果改用施加磁场后,即定形的磁流体来封闭转轴与定子系统,则可以做到长期使用。只是为了防止磁流体泄漏到血液中,需要采取一些措施进行预防,例如,空气层结构、三明治结构等。

(3) 磁性联轴器(图 3.13、图 3.16) 将电机轴和血泵轴进行分离,在分离处穿越机

壳通过永磁体实现连接的机构称为磁性联轴器,它不需要密封圈。这种联轴器已经在手术用的离心血泵上得到普及。

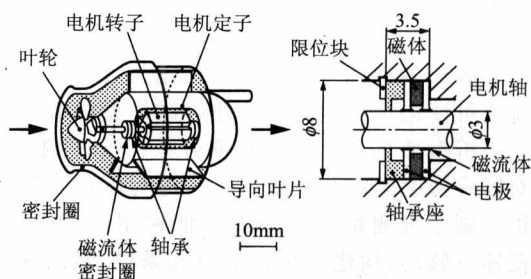


图 3.18 磁流体密封圈型轴流血泵
(北海道大学·庆应大学, Valvo-Pump)^[8]

(4) 叶轮直接驱动(图 3.15) 在叶轮内嵌入永磁体、在定子上设置线圈组,构成直流无刷电机,称为(叶轮)直接驱动机构。这种机构不发热,能对减小泵的尺寸作出贡献。

(5) 经皮变压器 按照变压器的原理在皮肤内、外让线圈相对,通过无线方式可以提供十几瓦的电量,传送效率能达到 85% 以上^[9]。

3.2.4 血液相容性评价法

人工心脏的血液相容性,最初是从材料和血流的观点来进行设计的,最终还需要通过动物实验来进行评价。在材料方面,迄今为止的人工心脏的使用寿命均为短期的,因此材料以聚亚安酯等抗血栓性的聚合物为主。如果是长期植入人体内的人工心脏,那么它应该既符合血液相容性的要求,又能满足耐久性的要求,其材料主要以钛或钛合金为主。从血流观点来看,在开发过程中以下的工程实验方法很有效:

(1) 溶血试验 考察血球破坏特性的溶血试验,一般的方法是采用新鲜的动物血,在满足血液试验回路的条件下进行数小时的运转,中间需要采集血液的样本,对从血球中流入到血浆中的血色素量进行分光处理^[10]。这样的试验在实验室中就可以完成,但由于存在个体差别,实验只能完成同时、同地点的相对评价。

为了克服这种制约带来的问题,有人尝试用模拟血液代替动物血液进行溶血绝对评价的试验。即在以聚亚安酯等为材料做成的

直径为 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的微型胶囊内封入一种隐色染料,制成牛乳状的悬浊液取代血液进行循环,然后定量测量从胶囊内释放出的染料量^[11]。

(2) 血流可视化实验 该实验是基于最近发展起来的图像处理技术和激光技术,将血流可视化的测量方法。往丙烯模型内放入同一折射率的 64wt% (质量分数) NaI 溶液,对同一密度的示踪粒子 (SiO_2) 的行踪进行拍摄。制作被测量泵的放大相似模型,让其在低速下转动,构建一个相似研究条件,然后采用高速摄影机,用 Ar 激光仪做照明光源,最后将摄制的图像保存在磁盘上进行自动解析(图 3.19)。这样,利用可视化就能够确定高剪断应力导致的血球破坏和低剪断应力导致的血液凝固分别发生在何处^[12]。

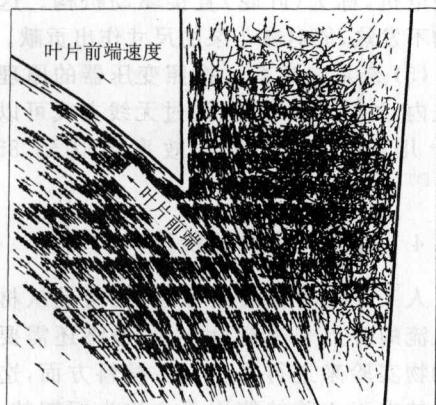


图 3.19 血流可视化例子
(离心水泵出口,粒子示踪法)^[12]

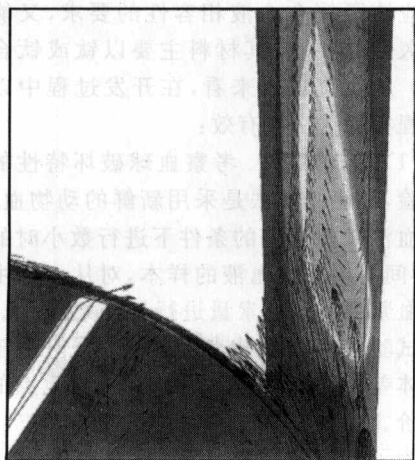


图 3.20 数值流体解析举例
(离心水泵出口, $k-\epsilon$ 法/有限体积法)^[13]

(3) 数值流体分析 数值分析法也属于具有再现性的评价工具。有多种方法可以选择使用,例如,纳维埃-斯托克斯(N-S)方程的直接解法(DNS)、Large Eddy Simulation (LES)、紊流模型近似解法($k-\epsilon$ 法)等,既有商业版,也有自编的,各具优、缺点。例如, $k-\epsilon$ 法虽然能节约时间,但是从紊流模型中难以模拟分离流,对应力的评价往往偏大。同样,也有人指出 DNS 法太耗费时间^[13]。

3.2.5 展望

一提到心脏病重症患者,人们往往会认为他们应该住院进行治疗。今后如果能够植入人工心脏,就可以改在家里接受家庭治疗,甚至可能回归社会。机电一体化技术支撑生命活动的时代已经到来,在这方面,民众对日本的技术力量寄予厚望。为了早日制造出这样的治疗仪器,医学和工程学界应该携起手来共同推进产品的开发。

山根隆志

3.3 人工中耳(听觉修复)

3.3.1 耳的结构与功能

声音以空气疏密波形式传到外耳,通过耳廓的拢音作用,沿着外耳道进行传播,引起鼓膜振动。鼓膜的振动又经听小骨(槌骨、砧骨和镫骨)高效地传播到内耳的前庭腔。

3.3.2 失聪的种类

根据病变发生的部位的不同,失聪分为以下三种:

(1) 传导性耳聋 传导系统出现故障,如中耳炎、事故等原因导致鼓膜破损,或者听小骨的振动性能恶化等。

(2) 感音神经性耳聋 由于内耳、听觉神经或听觉中枢部分出现故障而导致的失聪。

(3) 混合性耳聋 传导性和感音神经性均出现故障。

3.3.3 人工中耳

患中耳传导性疾病(慢性中耳炎或中耳炎后遗症、中耳炎术后症等)的患者,经过多种听力改善手术(属于鼓室成形术)方法,可以改善听力。但是,由于病情状况不同,术后听力改善的效果有可能会不完全,在对话中

听取对方声音时仍然会有问题。在这种情况下,人工中耳作为一个代偿方案已经开始使用。与佩戴助听器相比,植入人工中耳的优点是音质好、听取清楚、杂音少,而且外耳道也不必堵塞,给人造成的负担小。

上面所提到的人工中耳,就是一种能代替中耳传导系统的鼓膜、听小骨(槌骨、砧骨和镞骨)功能的植入型助听器。图 3.21 为人工中耳的外观。

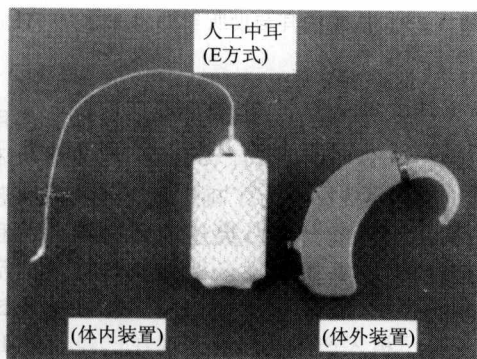


图 3.21 人工中耳的外观(Rion)

3.3.4 人工中耳的结构、原理和性能

1. 结构和原理

人工中耳由体内装置和体外装置构成。体外装置装戴在耳廓的后部,体内装置则植入到乳突腔和中耳腔中(图 3.22)。

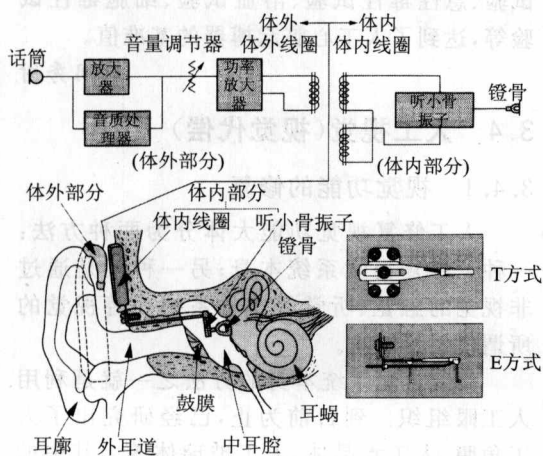


图 3.22 人工中耳的结构

1) 体外装置

如图 3.22 所示,体外装置由话筒、放大器等构成,外观与耳佩戴助听器相同。

进入话筒的声音转换为电信号后,通过音量放大器、音质调节器的处理,再由体外线圈转换成磁信号。这样的磁信号可以贯穿皮肤,对植入体内的体内线圈产生励磁作用。

2) 体内装置

体内装置由体内线圈和听小骨振子构成。体内线圈植入乳突腔内,听小骨振子植入中耳腔内。听小骨振子前端的振动元件通过小柱等与镞骨相连接。

体内线圈在体外线圈的励磁磁场作用下产生电信号,该电信号通过听中轴或小骨的振动元件被进一步转换为机械振动,从而使镞骨产生振动。

(1) 体内线圈 体内线圈是由两个具有同样特性的线圈(感应线圈和消磁线圈)反相位连接而成的。消磁线圈能够消除因电器产品或变压器等产生的泄漏磁场(平行磁场)的影响。

(2) 听小骨振子 听小骨振子由止动块和振动元件组成。手术方法不同,止动块也有 T 方式和 E 方式两种。

振动元件采用双压电晶片结构的压电陶瓷,以达到超小型、低能耗、高可靠性、长寿命以及耐外界磁场干扰的目的。

这种压电陶瓷的特性是施加压力则产生电压,或者反过来,施加电压则产生伸缩。

双压电晶片结构如图 3.23 所示,即将两片具有上述特性的同性能材料进行对贴使用。

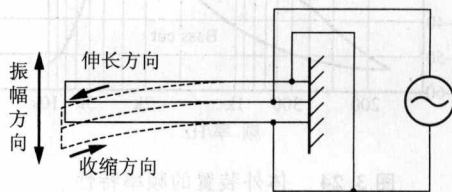


图 3.23 双压电晶片压电陶瓷的结构

如图 3.23 所示,将压电陶瓷的薄片一端固定,并在固定端的上、下极两侧施加交流电压,那么自由端将在长度方向按照与电压成比例的方式产生伸缩运动。因此,如果把按照反相位伸缩接线的两枚压电陶瓷薄片进行对贴,那么在薄片的厚度方向上将会产生振动。

这种人工中耳能取代中耳传导系统,直

接使镫骨产生振动,因此瞬态响应品质好,能得到失真少、自然清晰的音质。

2. 性能

1) 各个部件性能

表 3.1 中列出了人工中耳各个部件的性能。

表 3.1 各个部件性能

体外装置	话筒	灵敏度: -65dB (电介体)
	体外线圈	$1000\text{T} \times 30\mu\phi$
	放大器增益系数	$67\text{dB} \pm 3\text{dB}$
	高频失真率	小于 4%
	输出限制装置	$18\text{dB} \pm 3\text{dB}$
	音质调节器	瞬时短脉冲截止连续可变 (500Hz ; $17\text{dB} \pm 3\text{dB}$)
	使用电池	1.3V(纽扣电池)
体内装置	体内线圈	$5000\text{T}/30\mu\phi \times 2$
	听小骨振子	共模抑制比: 大于 -40dB 静电电容: $1500\text{pF} \pm 300\text{pF}$ 灵敏度: $10\mu\text{m}(1\text{V})$
	导线	绝缘电阻: $10\text{M}\Omega$
		弯曲强度: 大于 10 000 次 拉伸强度: 大于 250g

2) 体外装置的频率特性

图 3.24 所示为包含音质调节器在内的频率特性。

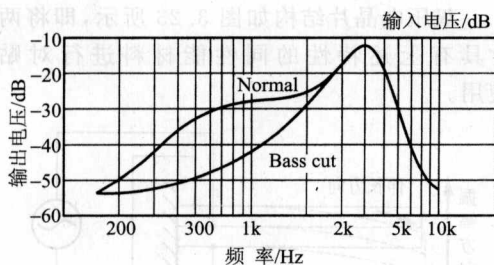


图 3.24 体外装置的频率特性

另外,如图 3.25 所示,将动物实验得到的助听器的耳机输出音压与人工中耳的输出振幅与镫骨的振动振幅进行比较,其结果表明人工中耳的瞬态响应特性更好。

3.3.5 安全性

医疗产品要从有效性和安全性两个方面去进行评价。在安全性方面,有义务进行活体的相容性试验、化学试验、生物学试验等。

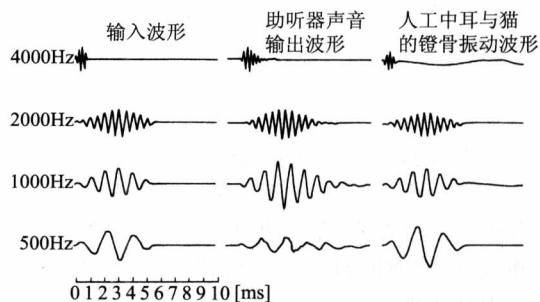


图 3.25 人工中耳与助听器的瞬态响应特性

1. 活体相容性

活体相容性要求植入体内的器物所使用的原材料与活体组织具有良好的亲和性,不会产生排斥反应。为了确认相容性问题,曾经给猫植入振动元件,经过两到三年的过程跟踪观察,结果表明该元件的各种材料的活体相容性良好。另外,对人也一样,在临床试验中最早植入产品的患者到现在已经超过 10 年时间,并没有引起特别的副作用,进展十分顺利。

2. 化学试验

与活体组织接触的材料,正在进行溶出物试验,达到了人工心脏起搏器的基准值。

3. 生物学试验

关于生物学试验,正在进行发热性物质试验、急性毒性试验、溶血试验、细胞毒性试验等,达到了人工心脏起搏器的基准值。

藤冈秀树

3.4 人工视觉(视觉代偿)

3.4.1 视觉功能的修复

人工修复视觉功能大体分为两种方法:一种是修复视觉系统本身;另一种就是通过非视觉的触觉、听觉等感觉系统代替视觉的所谓代偿感知法。

修复视觉系统本身的方法之一就是利用人工眼组织。到目前为止,已经研究出了人工角膜、人工水晶体、人工玻璃体等。其中的人工水晶体被称为眼内晶状体,已经在白内障治疗方面达到了实用。利用干细胞的再生医学工程也显示了它实用的潜在可能性。

如果视网膜、视神经系统或脑的感知系

统出现了故障,那么靠人工眼组织来修复就很困难。为了解决这些问题,最近有一项应用 LSI 的仿生学尖端研究受到了人们的广泛关注。

该方法在视网膜的神经元细胞及视神经、大脑皮层视觉中连接多个电极,通过电刺激使患者从感觉到的光景中获得视觉^[1]。研究这种人工眼的主要目的是为了修复中途失明者的视觉功能,但是它离真正实用还有相当长的时间。

代偿感知法中离我们最近的例子就是将文字转换为盲文点字,再通过指尖获得信息,或者由朗读磁带经由耳朵获取信息。这些方法均无需医学治疗。随着当今技术的发展和人类特性的进一步解明,融合了这些技术的视觉代偿领域的成果将会非常引人注目。

3.4.2 视觉代偿原理

基于代偿感知法的视觉修复依靠由三要素构成的装置来实现。这三个要素是:捕捉视觉信息的传感系统、处理传感器信号的变换系统、提示触觉和听觉信息的人机界面系统(显示器)。

1. 传感系统

要让传感系统达到与真眼一样的适应所有环境的动态范围是很难的。但是,从视觉信息信号化的目的出发,可以利用摄像机、CDD 图像传感器等来实现这一目的。另外,如果用来支持步行状态,也可以采用便携式发射超音波或激光的信号检测装置。

2. 处理/变换系统

将传感装置拍摄的空间信号以一一对应的关系提示给触觉或听觉的方式称为直接变换方式。具体来说,尽管需要进行信号的归一化或轮廓强化等图像处理,但是从视觉空间与所提示的触觉空间或听觉空间直接对应的意义上讲,可以称之为直接变换方式。

与之相对应,对视觉信号先进行模式识别,然后只将必要的信息转化成人们易于理解的合成声音或盲文点字等的方式称为识别处理方式。

3. 人机界面系统

人机界面是指用于传递信息的显示器。如果说前两项我们可以依赖已经确立的工业

技术,那么要使基于触觉的视觉代偿取得成功,则还需要下工夫。不过,如果听觉显示器采用扬声器,那么在技术上基本不成问题。

3.4.3 各种视觉代偿仪

视觉代偿仪的典型例子是 1972 年发表的美国 Smith-Kettlewell 视科学研究所的 TVSS(Tactile Vision Substitution System)系统^[2]。1975 年,日本工业技术院制品科学研究所(即现在的产业技术综合研究所)也开发出了同样的系统^[3]。

这些系统借助于螺线管或空气活塞的振动将拍摄到的视觉对象的灰度信号改成触觉提示,此即所谓的触觉感知电视机。人们也研究了多种在音像世界中实现提示的所谓听觉感知电视机^[4],但是要真正实现与眼睛同样水平的功能非常难。这主要是因为人本身固有的一些特点所致。例如,人的各种感觉系统具有获取特有信息的能力,而且视觉系统获取信息的能力(10^7 bit/s)比触觉系统(10^2 bit/s)和听觉系统(10^4 bit/s)的要强得多。因此,系统的用途总是受到一些限制。

1. 传递文字

要求代偿眼能阅读书本很有必要。商品化的盲文阅读器 Optacon 以触觉代偿装置的形式被开发出来。这个装置将文字进行光电变换,然后将字形部分提示在能用手指触摸的微小振子阵列上。

听觉的代偿装置则采用 OCR 技术来辨识文章,并通过语音合成器来进行阅读,十分实用。因此,基于这种方式的阅读器已在市场开始销售。在市场上销售的产品中,虽然尚未装备作为代偿眼的视觉传感器,但是已经配备了最新的 GUI 化(图形用户接口)的计算机操作支持功能和能阅读画面文字的软件。

2. 传递图形

对听觉显示器而言,语音合成是代偿眼的一种十分有效的界面,但让它代偿眼光学系统固有的功能,即传递图形、图像等则无能为力。在这种场合,触觉显示器却很有效。

将传感器获得的图像提示给触觉显示器有两种方式:一种是动态方式,即用户通过手指或手掌触摸触觉显示器,获得变动的信息;

另一种是静态方式,此时已触觉化的画面暂时静止,可以随意挪动手指或手掌来进行感觉。静态方式的长处是用户可以随意地去理解复杂的画面,但在耐用性条件方面前者也不错。

3. 步行支持

支持步行的方式有障碍物检测方式和环境信息提示方式。前者通过激光束检测出人到障碍物的距离,然后通过声音或振动方式进行警告(激光拐杖)。后者则将超声波反射信号转换为可收听的声音(超声波眼镜)。有的系统还可以利用 GPS 通知步行者的位置,或者能够在设施内产生诱导信号。

4. 日常生活支持

为了援助视觉患者的日常生活,可以通过一些小创意,制作一些器具起到代偿眼的作用,完成特定的任务。例如,利用传感器测出服装或领带的颜色后,借助于声音传达出去,或者分辨纸币等。

3.4.4 视觉代偿中的机电一体化

在代偿感知法的实用化过程中,由于视觉信息具有广泛的空间性,代偿感知系统应该如何进行空间信息提示并加以实现就成为一个关键问题。触摸显示器的实用化是解决这一问题的一个途径。

在这项技术中,显示器是用小型电极阵列制作的,不过多数用户都讨厌电刺激,因此难以将它进行普及。其结果是,改成触摸显示器用机械刺激(触摸、触压、振动、移动)来提示信息。

迄今为止的认知心理学研究成果指出,对于触摸显示器提示的信息,人们偏好具有凸凹感的浮雕图案^[5,6]。图 3.26 举出其中的一个例子,这个例子给出的图案信息就是由触摸显示器的研究结果提供的,这种方式受到用户的欢迎。

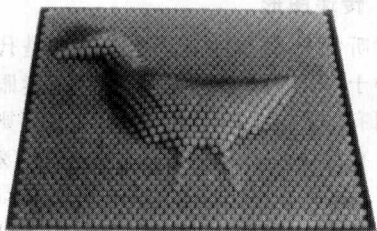


图 3.26 易理解的视觉信息触觉化图案举例

实现触觉显示器提示的方法是将多个触针排列成阵列,让触针进行上、下移动构成整体浮雕图案。那么应该如何安排触针阵列的驱动器呢?从这一点来看,机电一体化技术在各种仿生代偿设备领域中是大有用武之地的。

提示浮雕图案的驱动器可以选用的元件主要有以下一些:①电磁力利用型(步进电机、DC 电机、螺线管、直线电机);②静电力利用型(静电电机);③机械摩擦型(超声波电机);④其他(形状记忆、致冷器元件、压电陶瓷、液压、气压)。

这些元件应该满足以下条件:①可控性(位置与操作电源);②元件条件(小型化、制动机构、耐负荷、响应、发热、质量);③系统化(维护性、结构、导线数、发热、耐久性、成本)。

图 3.27 给出了一个用于盲人三维信息提示装置的超小型步进电机(直径 $\phi 4$)的结构和触针的驱动机构。触针的升降使用了滚珠丝杠^[7]。整个系统由 64×64 根触针的阵列组成。

利用代偿感知法的人工视觉与植入体内的人工眼不一样,它不需要医疗的参与,因此能够很方便地提供给需要视觉修复的患者使用。但是在技术方面今后还有很多值得探讨的问题。

清水 丰

3.5 人工关节

人工关节的历史十分久远,在 19 世纪末期现代人工关节的雏形就已经问世了。自从 1962 年 Charnley 用不锈钢和高密度乙烯制作了人工髋关节以来,人工关节置换手术在关节外科中占据了很重要的位置。

3.5.1 生物学条件

人工关节及体内固定器具的材料应该具备的生物学条件如下所示:

- ① 化学稳定性、无毒性、无过敏性反应。
- ② 良好的活体组织相容性。
- ③ 无致癌性和抗原性。
- ④ 不会造成血液凝固或溶血。
- ⑤ 不会引起代谢异常。
- ⑥ 不会导致活体内部劣化与分解。
- ⑦ 不会被溶解流失。
- ⑧ 不产生吸附物或沉淀物。

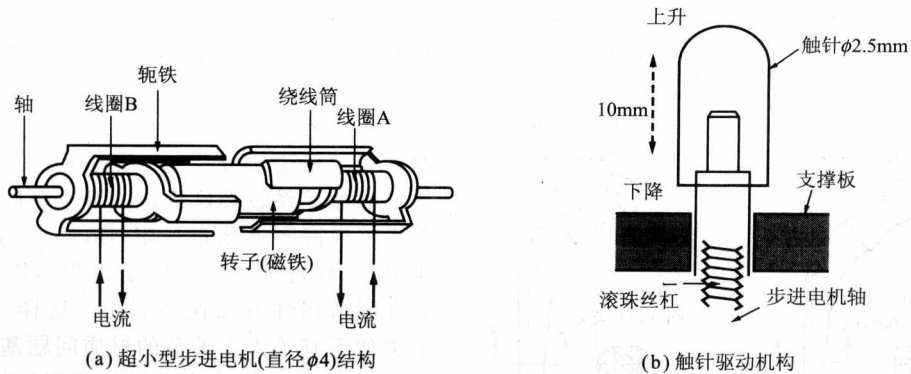


图 3.27 盲人用三维信息提示装置

这里所说的组织相容性,是指活体用材料与活体之间的相互作用。但是在最近,组织相容性这个用语被赋予了更广泛的含义,既包括与材料相邻的组织的局部反应,又涵盖全身反应。如果材料不会引起活体局部和全身反应,那么就称之为具有活体组织相容性的材料。

对活体用材料而言,其实活体内部是一个相当复杂的环境。除此以外,由于周期性负载或冲击性负载的作用,与通常的材料相比,活体用材料更有可能会经常发生腐蚀疲劳和蠕变腐蚀。不过发生这些变化的机制可以说目前尚未完全明了。其主要原因在于定量评价活体内的劣化需要很长的时间。直到最近,在实验室中,用较短的时间来预测活体内劣化问题的研究才终于启动。

3.5.2 力学条件

人工关节及体内固定器具用的材料所应该具备的力学条件如下所示:

- ① 静态强度(拉伸、压缩、弯曲、切断)。
- ② 适当的强度和硬度。
- ③ 耐疲劳性、耐腐蚀性。
- ④ 耐磨损性。
- ⑤ 润滑特性。

3.5.3 其他条件

除生物学和力学条件外,还需要考虑如下条件:

- ① 作为功能材料的特性(如物质的透过性、骨诱导性等)。
- ② 加工特性。
- ③ 连接性等。

由于活体用材料所处的环境与普通使用的环境大相径庭,因此,如果不特别注意试验方法的问题,就无法获得有说服力的评价。目前日本的实际情况是,有关活体用材料的组织及试验方法的标准还不健全。

3.5.4 人工关节的设计

关节成形术的历史很悠久,特别是髋关节,可以说是反映了整个整形外科的发展历史。关于这一点,在 Scales(1967)的文献中有详细说明。例如,有人曾经使用小木片作为中间插入物修复颞关节僵直症,尽管在 19 世纪尚未达到人工关节的程度。Gluck 在 1890 年曾经使用过象牙材料的人工髋关节,不过由于它是用螺丝、树脂、轻石粉末、白水泥组成的骨接合剂进行固定的,这种人工关节并不具有多长时间的耐久性。尽管如此,这应该算是现代人工关节的雏形。

图 3.28 给出一个在活体亲和性和耐磨损性方面都十分不错的氧化铝陶瓷人工髋关



图 3.28 以氧化铝陶瓷为主的医用先进复合材料人工髋关节植入模式图

节植入模式图。图 3.29 则表示迄今为止仍然惠及人类的 Charnley 型人工关节的变迁。

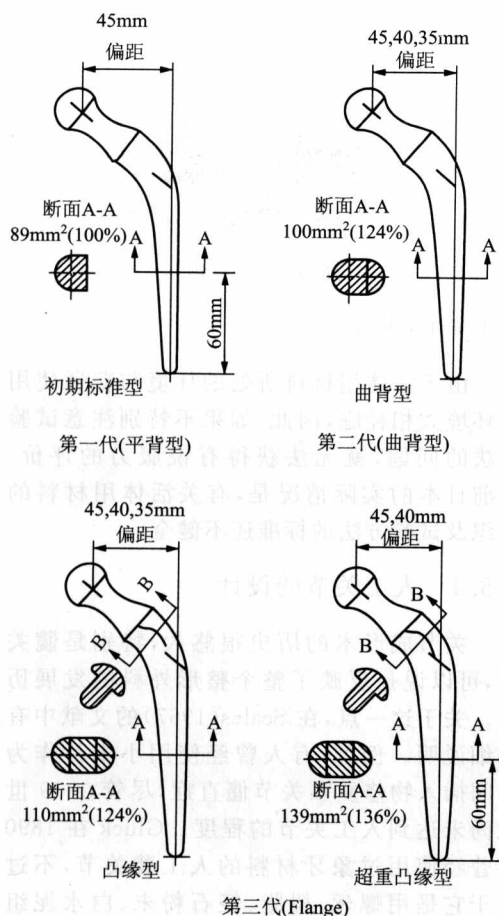


图 3.29 Charnley 型人工髋关节变迁图

据报告,金属,特别是已腐蚀的金属,不仅会溶入植入组织附近或周围组织,而且还会溶入血或尿中,引起 Co-Cr 浓度上升。但是在组织反应的强弱程度和致癌性等方面,材料本身与腐蚀碎屑或磨损碎屑都不一样。例如,尽管金属表面的溶解物有亲和性,但是磨损碎屑将产生肉芽组织,对动物有致癌性(还没有见到有关人体的致癌报告)。

人工关节材料应该有适当的强度、弹性、柔顺性、疲劳强度、磨损强度等,但是时至今日有关活体材料的标准化仍不完善。尽管以往也曾经进行过多种尝试,但结果却表明多少存在着这样或那样的问题。例如,1946 年 methyl methacrylate 公司开发的 judet 型人工骨头存在设计缺陷和易磨损的缺点;Charnley 在 300 例人工髋关节的髋承接腔中使用了

Teflon(polytetra-fluoroethylene),事后发现磨损碎屑会导致组织反应;polyaxetal(典型的工程塑料)材料人工关节也由于同样原因不耐用等。特别是关节中使用的材质,其摩擦和磨损问题就更重要了。一般来说,人造材料之间的摩擦系数都比活体关节本身的摩擦系数大。根据磨损测定认定,Co-Cr 合金、不锈钢或 Ti 系列合金与高密度树脂(HDP)的组合在耐磨损性方面比较突出。这样一来,看上去似乎有关人工关节的材质问题基本上得到了解决。但是,结合处以及耐用年数(现在一般认为是 15~20 年)等问题依然存在。连氧化铝陶瓷材料制造的髋关节最近也开始出现了破损的事例(表 3.2)。

表 3.2 完全人工髋关节的典型形式与其开始年份

类型名	承接腔	骨头材料	开始年份
McKee-Farrar	Co-Cr-Mo 合金	Co-Cr-Mo 合金	1956
Charnley	Teflon	SUS316L	1956
Charnley	UHMWP	SUS316L	1963
Mueller	UHMWP	Co-Cr-Mo 合金	1965
Boutin	氧化铝	氧化铝	1970
Weber	UHMWP	氧化铝	1972

注:UHMWP = ultra high molecular weight polyethylene.

3.5.5 下一代人工关节

回顾现代人工关节在材质领域的发展历史可以发现,尽管从 Charnley 型开始出现了不锈钢与高密度聚乙烯的组合,然后 Co-Cr 合金及钛合金的金属部件也相继问世,但在材质方面的进步仅仅限于在不含 Ni、V 强毒性的新钛合金的开发方面。相比之下,材料工程学的进展更加引人注目,如对羟基磷灰石、磷酸钙等陶瓷金属表面上做涂层处理,对金属颗粒或网格等多孔状金属表面做烧结处理等。人们也更乐意将氧化铝、氧化锆等在活体内具有稳定性的陶瓷材质用于人工关节的硬质部件中。

在发明高桥接度、高延展性的超高分子聚乙烯后,塑料部件的耐久性的问题得到了解决,但是磨损碎屑造成的问题仍然没有得到解决,因此涌现出了针对各种金属对金属、陶瓷对陶瓷之类的硬质部件的组合进行尝试的研究动向。

最近,最热门的技术革新是再生医疗技

术的出现。该项新技术不是通过人工物代偿活体功能,而是用活体本身的物质或细胞再培养出活体组织。现在,从患者身上取出关节软骨小片,再从中分离出所包含的软骨细胞,经过活体外培养繁殖后,将悬浮体重新移植到软骨破损处,再用骨膜等覆盖后使软骨在人体内部再生的细胞移植法已经开始流行起来。此外,还有人尝试在活体外进行培养繁殖时,以胶原凝体或活体内分解性聚合体的多孔介质作为细胞载体,让软骨细胞居中繁殖,产生细胞外基质后再移植回体内的方法(图 3.30)。



图 3.30 活体外软骨再生治疗概念图

无论如何,将多种人工材料巧妙地组合成装置的人工关节时代还会持续下去。但不容置疑,以细胞为主角的再生医学工程已经登上舞台,而且围绕再生医疗的霸权地位,国内外的竞争将愈演愈烈。

为了起到活体轴承的作用,关节应该满足稳定性、润滑性、吸收冲击性、活体相容性等要求。选择适合以上条件的活体材料,并设计人工关节或其他体内固定器具,需要医生和工程师们的紧密协作。由瑞士的外科医生、整形外科医生、工程学者等 15 人组成的研究组织 AO(Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthese)根据该组织的开发和创意构想开发出带压迫装置的体内固定器具,在骨折治疗史上具有划时代的意义。在日本,人们也期待建立类似的研究开发体制。

立石哲也

3.6 人工肌肉

在关节的屈伸运动中,由收缩肌肉与伸展肌肉形成的一对肌腱(腓腓肌)发挥作用。人体肌肉的张力约有 0.5MPa,对神经脉冲的

响应时间为 50~100ms。人工肌肉作为仿动物或仿人的机器人的驱动源,在医疗、辅助装置中,均要求其质量既轻,输出功率又大。人工肌肉是一种能模拟、代偿肌肉伸缩能力的直线驱动器。随着技术的进步,机器人虽然已经可以模拟动物或人类的各种运动能力了,但从本质上说,它所能应付的作业仍然非常有限。这主要是由于在构建一个实现精细动作的多自由度复合运动系统时,如果要求体积极其紧凑,则非常困难。

3.6.1 微型化与表面张力

现在用得比较多的驱动器主要是电磁电机,它在输出功率、质量、控制性能及响应速度等方面具有明显的优越性。但是随着尺寸的减小,它将面临效率降低的严重问题。小型化引起效率降低的主要原因在于与按体积提供输出的电磁力相比,此时表面的摩擦力已经无法再忽略了。因此,新一代的驱动器正在从按体积输出的方向转变到按表面积输出的方向进行发展。显然这需要从原理上开发新的驱动源。下面详细介绍可能作为新原理的、基于肌肉分子电机的肌动球蛋白的运动功能。

3.6.2 肌动球蛋白(actomyosin)的运动功能

肌肉的收缩作用是由作为分子电机的肌动蛋白(acto)和肌球蛋白(myosin)的相互作用而引起的。肌动蛋白是一种相对分子质量为 42 300 的球状蛋白质分子(大小为 5nm),它在体内聚合成线状的蛋白丝(filament)(称为 F 肌动蛋白,长度为 1000nm)。肌球蛋白是一种相对分子质量为 480 000 的蛋白质分子,由球状部(称为 S1,宽度 6 nm、长度 16 nm、相对分子质量 120 000)和长尾部(相对分子质量 120 000)两个分子构成,彼此的尾部缠卷成线圈状,形成二聚物(dimer)。

在有腺苷三磷酸(ATP)的条件下,若 S1 与 F 肌动蛋白相互作用,平均一个 S1 最大能产生 6pN 的作用力。一个 S1 在一次 ATP 水解反应(周期 0.1s)中,平均能驱动 F 肌动蛋白移动 10~100nm 长的距离(无负荷时)。这个距离远大于仅改变 S1 的结构所能移动的距离。S1 与 F 肌动蛋白之间的产生滑行相互

作用的关键被认为在于滑行运动具有零星使用 ATP 水解反应能量的机制(图 3.31)^[1]。

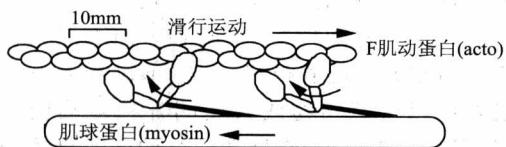


图 3.31 肌动球蛋白(actomyosin)运动模式图

如果一根 F 肌动蛋白上有多个 S1 同时作用,产生的作用力可以进行累加计算。从一根 F 肌动蛋白的最大张力为 200pN 反过来进行推算,可以知道至少应该有 30 个 S1 同时输出作用力^[2]才能使 F 肌动蛋白达到最大张力。S1 可以从三个方向接近 F 肌动蛋白。其结果是,一根 F 肌动蛋白(螺旋节距 37.5nm)的周围每隔 14.3nm 就存在 6 个 S1,但是能按照合适的方向结合在一起的最多只有一个。也就是说,在一根 F 肌动蛋白上最多只能有 70 个 S1 起作用。这样,在有可能发生相互作用的 S1 中,必须有一半以上完全输出作用力才有可能产生 200pN 的作用力。因此,与其说是在某个特定结合部产生作用力,还不如说是在更大范围中都有可能发生作用力。这充分表明 S1 与 F 肌动蛋白之间的相互作用主要源于表面作用力。表面作用力是基于表面的自由能量变化的力,是多个原子之间相互作用的热量统计平均值。

3.6.3 微型化可能的新原理

1. 电致伸缩应变高分子膜^[3]

Zhang 等介绍了有关电子射线照射 PVDF-TrFE 共聚物的巨大电致伸缩和强诱电体特性^[4]。该报告指出,如果经电子射线照射,将引起强诱电性的干涉(coherent)极化范围分裂成纳米级尺寸,然后施加于电场,那么极化范围的尺寸将发生变化,整个材料会产生 4% 左右的变形。这个数字是迄今为止只有约 0.1% 的变形量的几十倍。所使用的电场强度几乎达到了绝缘破坏的临界值,为 10~150MV/m。

2. 静电人造硅橡胶

R. Pelrine 等^[5]将金溅射到人造硅橡胶膜的上、下两个面上,形成锯齿状涂层的柔性电极,并施加 200V~5kV 电压。那么根据麦

克斯韦应力($p = \epsilon \epsilon_0 E^2$),膜将朝着厚度的方向压缩,同时面积将沿着横向扩展。厚度方向的变形量 s_z 为 $s_z = -p/Y = -\epsilon \epsilon_0 E^2/Y$,而横向方向的变形量为 s_x 。在体积一定的假设条件下, s_y 由 $(1-s_x)(1-s_y)(1-s_z)=1$ 确定。这种非延伸膜的直径变形为 63%,它的响应时间很短(0.4ms)。据报道其变换效率为 85%。如果是延伸性丙烯酸类人造橡胶,虽然其响应时间大于 30ms,但其变形量甚至高达 300%。将该薄膜状人工肌肉卷成长 10mm、直径 3mm 的装置。该装置的行程为 5%~10%,产生 1~2g(0.01~0.02N)的作用力。进行换算后,1cm² 单位截面积上的作用力为 20g。

上述材料需要在高分子材料绝缘破坏的极限边缘条件下使用。与此相对比,平井等^[6]报道说,他们在聚氨基甲酸酯膜的双面进行金沉积后,在 200V 左右相对比较低的电压条件下(2MV/m),即可产生高速的屈曲运动。

3. 高分子凝胶

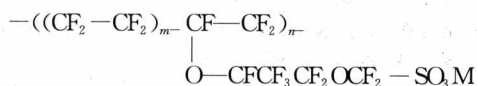
长田等^[7]制备了由硬脂酸丙烯酸酯与丙烯酸生成的共聚物凝胶。它属于一种形状记忆材料,在 50℃ 以下时像塑料一般硬,超过 50℃ 后它变得如同橡胶一样软。加热到相变温度以上使其产生变形后,如果接着进行降温,那么这种材料就将维持已有的形状。不过一旦再次加热超过相变温度,它会很快恢复原来的形状。这是其他材料所没有的高分子凝胶的刺激响应性和大变形的例子。

长田等还找到了改善高分子凝胶最大弱点,即强度不够的一个划时代的方法。这种水凝胶材料弹性好,断裂强度达到 10MPa,因此人们对它在人工肌肉中的应用寄予很大的期望。

4. IPMC

如果是离子性高分子凝胶,那么施加 1V 到数十伏的低电压就可以使之驱动。这就是小黑等开发的低电压驱动的高速屈曲材料^[8]。IPMC(离子导电性高分子/金属复合体 Ionic Polymer Metal Composite)是在 na-fion(全氟磺酸树脂)多孔膜的两个面上不规则地镀金而制成的。研究表明,将其浸入 NaCl 等盐水溶液中,并施加 1V 左右的直流

电后,它能迅速屈曲。全氟磺酸树脂具有以下结构:



如果施加电场,离子浓度出现偏差,在膜内外两侧将因此而产生浸透压差,从而引起屈曲。这种材料制成膜厚 0.17mm、宽 1mm、长 20mm 的装置可以产生 10Hz 左右的驱动作用。人们期待这些材料能应用于包括塑料软管方向控制等医疗应用在内的微机器人领域^[9]。

5. 静电膜驱动器

樋口等报道了一种高强度静电膜驱动器^[10]的研究成果。在聚酰亚胺膜表面设置高电阻层作为滑片,在膜状定子上沿收缩方向和垂直方向平行设置多条线状电极,并施加 500~1000V 的三相电源形成行波。在电场作用下,滑片电阻层内产生电荷,由于它们在电场的前进方向上受到库仑力的作用,因此滑片获得推力,在定子之间滑动收缩。樋口等的样机在宽 127mm、高 36.5 mm、最大长 182mm 的装置(图 3.32)上施加 1500V 三相电源,结果产生很大的作用力,最高达 310N,即该装置 1cm² 截面积能产生 600g 作用力。这个数字相当于人类肌肉的 1/5~1/10。

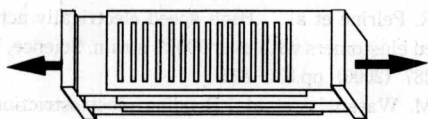


图 3.32 静电膜驱动器

表 3.3 引用了 Perline 等的数据,对几种材料的特性进行了比较^[5]。

表 3.3 人工肌肉用各种研究材料性能对照表

材 料	最大变形/%	最大应力/MPa	弹性变形能比密度/(J/g)
硅树脂(silicone)	32	1.36	0.22
聚亚安脂 (polyurethane)	11	1.6	0.087
超电致伸缩高分子 (PVDF-TrFE)	4	15	0.17
PZT	0.2	110	0.013
PZN-PT 单结晶	1.7	131	0.13
电致伸缩高分子 (PVDF)	0.1	4.8	0.0013
形状记忆合金	>5	>200	>15

续表 3.3

材 料	最大变形/%	最大应力/MPa	弹性变形能比密度/(J/g)
(NiTi)			
形状记忆高分子 (polyurethane)	100	4	2
导电性高分子 (polyaniline)	10	450	23
电解质高分子凝胶	>40	0.3	0.06
磁致伸缩材料	0.2	100	
天然肌肉	40	0.35	0.07

(摘自 Perline, Kornbluh)

3.6.4 结束语

本节介绍的新原理驱动结构中,以人造橡胶和膜驱动器的性能更好一些。人造橡胶所产生的力属于一种体积力,由于被超薄膜化处理,绝缘破坏电压相对提高,能施加比预想更高的电压。这可以说是进行薄膜化后提高储存能量密度的成功案例。但是,虽然在材料性能方面它比肌肉优越,但也面临一个不争的事实,即由于它的体积大,用这种材料做成的驱动器要达到肌肉水平绝非易事。膜驱动器是装置化的成功案例。从中我们可以看出,能否掌握表面或界面中储存的能量利用是实用化的关键。另外,高分子凝胶属于高强度材料。凝胶具有溶媒能在高分子网格中移动的特殊结构,因此值得对其进行多方位开发利用。人工肌肉的开发或许会随着装置的小型化而实现,若能如愿的话,那么它或许将成为最能接近人类或动物动作的必不可少的驱动部件。

铃木 诚

参考文献

- 3.1 假臂与假腿(四肢的修复)
- [1] P. E. Klopsteg and P. D. Wilson: Human Limbs and Their Substitutes, Hafner Publishing Company, New York (1954) pp.481-616
- [2] 中川ほか: オール・イン・ワン・インテリジェント 大腿義足, バイオメカニズム 8, 東京大学出版会 (1986) pp.227-235
- [3] 藤本浩志ほか: 歩調適応制御を有する階段昇降可能な大腿義足, バイオメカニズム 10, 東京大学出版会 (1990) pp.247-257
- [4] K. James et al.: Active Suspension above Knee Prosthesis, Proceedings of 6th International Conference on Biomedical Engineering, Singapore

- (1990) pp.317-320
- [5] 前田寛ほか：階段の昇降が可能な動力義足の試作，東京大学出版会，バイオメカニズム7 (1984) pp. 178-188
 - [6] W. C. Flowers et al. : An electro hydraulic knee-torque controller for a prosthesis simulator, ASME J. of Biomechanical Engineering, Vol.99, No.8 (1977)
 - [7] D. L. Grimes et al. : Feasibility of an active control scheme for above knee prostheses, ASME J. of Biomechanical Engineering, Vol.99 (1977) pp.215-221
 - [8] J. Stein et al. : Stance phase control of above-knee prostheses ; knee control versus SACH foot design, J. Biomechanics, Vol.20 (1987) pp.19-28
 - [9] 西川大亮ほか：個人の特性に適應するEMG識別装置の開発—特性の動的変化に対する帰納学習手法の適用—，第20回バイオメカニズム学術講演会予稿集 (1999) pp.500-504
 - [10] 森田聡ほか：義手インターフェースの制御工学的考察—EMG処理と義手制御—，第20回バイオメカニズム学術講演会予稿集 (1999) pp.490-493
- ### 3.2 人工心臓
- [1] 立石哲也編著：メディカルエンジニアリング，米田出版 (2000) pp.208-227
 - [2] 電気学会電磁駆動型人工心臓システム調査専門委員会編：電磁駆動型人工心臓，コロナ社 (1994) pp.16-22
 - [3] S. Saito et al. : European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, Vol.19 (2001) pp.678-683
 - [4] P. A. Watterson et al. : Artificial Organs, Vol.24, No.6 (2000) pp.475-477
 - [5] T. Yamane et al. : ASAIO Journal, Vol.43, No.5 (1997) pp.M 635-M 638
 - [6] S. Ichikawa et al. : Journal of Artificial Organs, Vol.5, No.3 (2002) pp.208-210
 - [7] K. Yamazaki et al. : ASAIO Journal, Vol.43, No.5 (1997) pp.M 686-691
 - [8] R. Yozu et al. : Artificial Heart 4, Springer (1992) pp.267-272
 - [9] K. Shiba et al. : ASAIO Journal, Vol.45, No.5 (1999) pp.466-470
 - [10] M. R. Mueller et al. : Artificial Organs, Vol.17, No. 2 (1993) pp.103-110
 - [11] O. Maruyama et al. : ASAIO Journal, Vol.48, No. 4 (2002) pp.365-373
 - [12] M. Nishida et al. : Artificial Organs, Vol.23, No.8 (1999) pp.697-703
 - [13] Y. Tsukamoto et al. : Artificial Heart 7, Isis Medical Media (2001) pp.337-343
- ASAIO : American Society for Artificial International Organs
- ### 3.4 人工視覚 (視覚代償)
- [1] 内川嘉樹，八木透：ハイブリッド型人工網膜，人工臓器，Vol.27, No.5 (1998) pp.703-707
 - [2] C. C. Collins : Tactile television-mechanical and electrical image projection, IEEE Trans. on Man-Machine Systems, Vol. 11, No.1 (1972) pp.65-71
 - [3] 和気典二，清水豊：視覚代行システム，計測と制御，Vol.14, No.12 (1975) pp.44-52
 - [4] 清水豊，和気典二：聴覚による盲人用視覚代行の基礎的研究，人間工学，Vol.17, No.6 (1982) pp. 277-284
 - [5] Y. Shimizu et al. : Tactile pattern recognition by a graphic display-importance of 3-D information for haptic perception of familiar objects, Perception & Psychophysics, Vol.53, No.1 (1993) pp.43-48
 - [6] Y. Shimizu et al. : Recognition of tactile patterns in a graphic display, Journal of Visual Impairment & Blindness, Vol.94, No.7 (2000) pp.456-461
 - [7] M. Shinohara et al. : Three-dimensional tactile display for the blind, IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering, Vol.6, No.3 (1998) pp.249-256
- ### 3.5 人工関節
- [1] 立石哲也：生体硬組織代替材料，生体材料学 (日本機械学会編)，オーム社 (1993) pp.79-156
 - [2] 立石哲也：メディカルエンジニアリング，米田出版 (2000) pp.165-207
- ### 3.6 人工筋肉
- [1] 柳田敏雄，児玉孝雄：筋肉細胞のバイオメカニクス (日本機械学会編)，オーム社 (1990) pp.19-54
 - [2] 鈴木誠，丸山修：バイオミメティクスハンドブック (長田義仁編)，エヌ・ティ・エス (2000) pp.958-963
 - [3] Y. Bar-Cohen : バイオミメティクスハンドブック (長田義仁編)，エヌ・ティ・エス (2000) pp.939-950
 - [4] Q. M. Zhang et al. : Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly (vinylidene fluoride-trifluoro-ethylene) copolymer, Science, Vol.280 (1998) pp.2101-2104
 - [5] R. Pelrine et al. : High-speed electrically actuated elastomers with over 100 % strain, Science, Vol. 287 (2000) pp.836- 839
 - [6] M. Watanabe et al. : Bending electrostriction in polyurethane using in situ ultraviolet and visible spectroscopies, J. Appl. Phys., Vol.88 (2000) pp. 5328-5333
 - [7] Gong Jian Ping, 長田義仁：秩序—無秩序転移するハイドロゲル—その形状記憶特性と運動特性—，機能材料，Vol.19, No.3 (1999) pp.5-12
 - [8] S. Sewa, K. Onishi, K. Asaka, N. Fujiwara and K. Oguro : Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) IEEE (1998) pp.148-153.
 - [9] 瀬和信吾ほか：バイオミメティクスハンドブック (長田義仁編)，エヌ・ティ・エス (2000) pp.932-938
 - [10] T. Niino, S. Egawa and T. Higuchi : High-power and High-efficiency Electro-static Actuator, Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1993) pp.236-241

第7篇 机器人在 制造业中的应用

Robotics Handbook

第 1 章 工业工程概论

企业所拥有的自有产品、服务和系统都是建立在自有技术之上的。因此,当企业引入机器人时,应该对本企业的自有技术、企业原有的条件进行充分的调查和了解。当然,引入机器人的目的除了提高自有技术外,同时也是在以人为本的基础上提高生产率,更大幅度地满足用户需求。由此看来,管理技术的重要性丝毫不亚于自有技术本身。

在制造业中,管理技术在避免由人工作业、设备与人组合作业所引起的浪费方面,不失为一种有效的方法,它所涉及的学科有工业工程(IE: Industrial Engineering,以方法工程为主要思想和方法)、人机工程学(ergonomics,以人与设备交互界面的合理设计为主要对象)、质量管理(QC: Quality Control,以提高原材料、半成品、成品的质量为目标)、制造工艺学(即制造工序的设计,追求产品制造方法,也就是追求工序的合理性)、工厂设计(以合理设计生产现场,如车间为目标)、设备管理(PM: Productive Maintenance,它的任务是提高与生产直接相关的机械设备的效率和可靠性)、价值工程学(VE: Value Engineering,它从功能的侧面改进产品或工序设计,避免浪费)、经济工程学(以设备投资的经济性为对象)等。下面我们列举上述管理技术中具有代表意义的几项并加以说明。

1.1 方法工程

1. 方法工程的体系

图 1.1 为方法工程体系的组成。

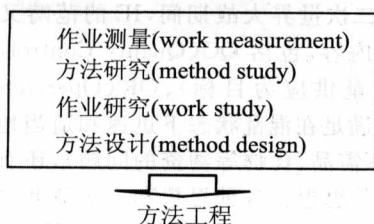


图 1.1 方法工程体系的组成

作业测量(work measurement)的原意是指在“合乎标准概念的作业人员进行标准作业”的条件下,完成某个产品所需的“标准时间”和单位时间的“标准作业量”的测量、分析(measurement),也就是指设定标准时间(standard time)的方法或与方法有关的实践。简单地说,就是与产品制作相关的时间研究(time study)。这是作业测量的狭义定义。当测量、分析的对象从最初的时间扩展到方法(method)后,作业测量的含义已经变得与作业研究(work study)等同起来。

所谓方法研究(method study)就是标准方法的设计和为此开展的与现行方法改进相关的方法或实践,其目的是在实际生产中改进现有方法,提高生产效率。

所谓作业研究(work study)是指把狭义的作业测量(以时间考察为代表)和研究方法研究结合起来,最大限度地发挥人、物、设备、信息等资源的作用,以提高系统生产效率为目的的各种活动。

所谓方法设计(method design)是对构成系统的人、物、设备、信息等投入资源的作业测量、方法研究和作业研究,在将各种投入资源进行有机结合的前提下开展设计,追求系统的经济性和效率目标。具体来说,就是将构成系统的投入资源按照目的组织起来,进行简化管理的设计。

方法工程就是包含作业测量、方法研究、作业研究、方法设计这四项内容的工程方法。它构成了工业工程的主体。

2. 方法工程和工业工程的历史

1) 工业革命导致了零件的互换性思想

18 世纪后半期,1764 年英国兴起了工业革命,James Watt(詹姆斯·瓦特)发明的蒸汽机加速了近代生产系统的基本形式——工厂生产的确立。Adam Smith(亚当·斯密)在著名的《富国论》(The Wealth of Nation, 1776 年)中阐述了产业分工和专业化的优势,后来

这种思想被扩展到整个欧洲和美国。

1798年,美国发明家 Eli Whitney(艾利·惠特尼)大力提倡互换性零件的概念,推动了枪支的集约化生产和与这种生产方式相关的设计的发展,于是进行大批量生产出现了契机。

到了19世纪,随着内燃机和电气的普及,工业革命继续迅速地扩大和发展,不过在生产场所(工厂)、生产方式等方面的改善并不明显。

2) 科学管理方法、作业测量和方法研究

科学管理方法的著名倡导者 Frederick W. Taylor(弗雷德里克·泰罗 1856—1915年)科学地分析了生产场所的问题,致力于推动以最小时间浪费组织劳动力和材料,实现高效率生产的概念。所谓的“Taylor Shop System”,即高效运用员工的科学管理方法,它的含义如下:

① 综合考虑,合理配置技术、智力、劳力、学习能力。

② 以秒为测量时间单位制定作业量标准,确定对劳资双方都公平的工作量。

③ 按照性能规格说明书、作业指导书等标准,实施工作流程的标准化和科学组织管理。

④ 建立管理者的职责就是管理活动的理念。

⑤ 基于金钱刺激(按能力分配)的原则来提高生产效率。

在他的学说里,以秒为单位的时间测量是所有“作业测量”的基础。在同一时期, Frank B. Gilbreth(弗兰克·吉尔布雷思, 1868—1924年)和 Lilian 夫妇将作业划分为若干个基本动作要素(therblig)进行研究,其目的是锁定并排除那些造成作业迟缓的动作,杜绝传统生产组织中不合理、无节奏、浪费的现象,开创了在方法研究方面的先河。

3) 作业研究(狭义的 method engineering)

1930年前后, A. H. Mogensen(莫根生)提出了“简化作业(work simplification)”的理念,将以往的作业测量和方法研究结合在一起,迅速改善了生产现场的作业状况。受到这一观点的影响,同一时期的 Harold B. Maynard 提出了将时间研究和动作研究综合

起来的“作业研究(method Engineering)”,得到了很多学者的认同,于是诞生了作业研究的概念。作业研究综合了 Taylor 的作业测量和 Gilbreth 的方法研究的理念,属于狭义的方法工程。有时也将这一狭义的方法工程称为经典 IE(old IE)。

4) 福特系统/IE

有关科学管理方法、作业测量、方法研究等的思想方法和分析方法经过彼此融合后,发展成为能促进大批量生产的有效技术和方法。1912年,在福特汽车公司(Ford Motor)的工程师 Henry Ford(亨利·福特),发表了“T型福特”,这是世界上第一条能够进行连续大批量生产的装配线。它是体现现有生产方式和生产系统改造的样板工程,从此确立了广义方法工程的思想。具体说来,这个思想是“方法设计”与此前 Maynard 所提倡的狭义方法工程(作业研究)两者结合的产物。后来,这个思想得到进一步拓展,成为从经济观点出发追求高生产效率的 IE 体系。

5) IE 的发展

随着装配线设计的普及,狭义方法工程(作业研究)逐步发展成为包含方法设计在内的广义方法工程——IE。

1927—1932年,在 Western Electric Company 的伊利诺伊州工厂, Elton Mayo(埃尔顿·梅奥)等进行了一次霍桑试验(Hawthorne study)。试验的初衷是调查确保最高生产效率的最优物理环境,始料不及的是其结果却弄清楚了心理学、社会学等人为因素对生产效率的影响。此外, Abraham Maslow(亚伯拉罕·马斯洛)等针对作业人员的态度和劳动欲望与作业的关系的研究、Douglas McGregor(道格拉斯·麦格雷戈)提出的有关人类劳动的“X理论、Y理论”等,也都是 IE 中有关人与之间的关系问题研究的比较有影响的成果。

第二次世界大战期间,IE 的范畴又补充了新的内容,包括 QC(Quality Control,以稳定的质量供应为目标)、OR(Operation Research,满足在混乱状态下迅速和适当地配发人员、军需品、食物等物资的问题),还有人机工程学等思想。各种思想和方法彼此之间的联系以及 IE 的发展历史均表示在图 1.2 所示的图谱中。

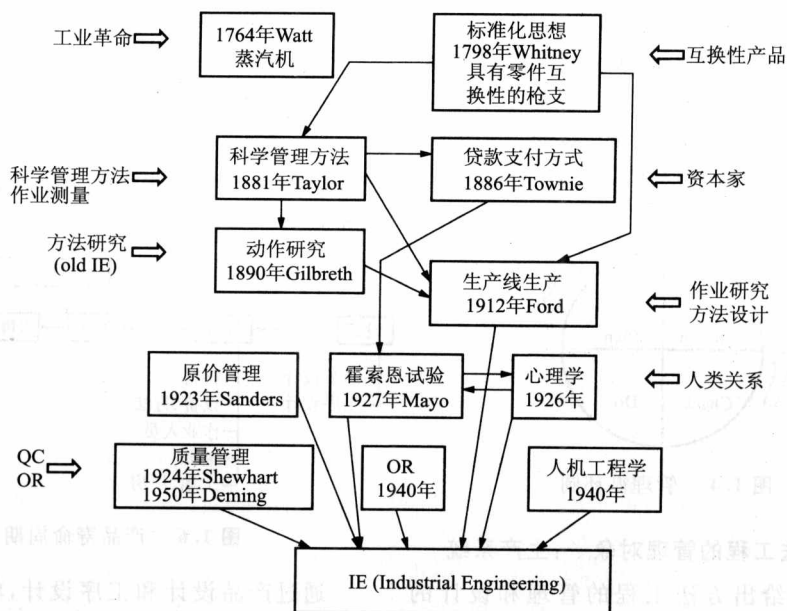


图 1.2 IE 的发展图谱

3. 方法工程的方法

处理方法工程的方法一般有两种：一种是指以现有系统为管理对象，在现有的约束条件下建立满足要求的系统，即所谓的“发现问题”或“改进问题”的“分析的方法”；另一种是指新系统的设计，此时可以无视现有的约束条件，根据原本的目的和功能，按照理想状态进行系统结构的设计，即所谓的“设计的方法”。

前一种方法靠发现系统瓶颈的状态、瓶颈的位置，然后对其加以改进，所以它属于分析的方法，这也是解决方法工程最基本的途径。在生产现场、经营活动的评价中，通常依照以下各项分析约束条件。当然，这些项目不仅可以用于约束条件分析，还可以充当发现问题和评价条件的调查研究内容。

P: Productivity	生产率
Q: Quality	质量
C: Cost	成本
D: Delivery	交货期
S: Safety	安全性
M: Morale	士气

此外，还用到下面有关满意度（satisfaction）的概念。

CS: Customer Satisfaction (顾客满意度)

ES: Employee Satisfaction (员工满意度)

SS: Society Satisfaction (社会满意度)

ES: Environment Satisfaction (环境满意度)

方法工程分析方法的基本步骤如图 1.3 所示。

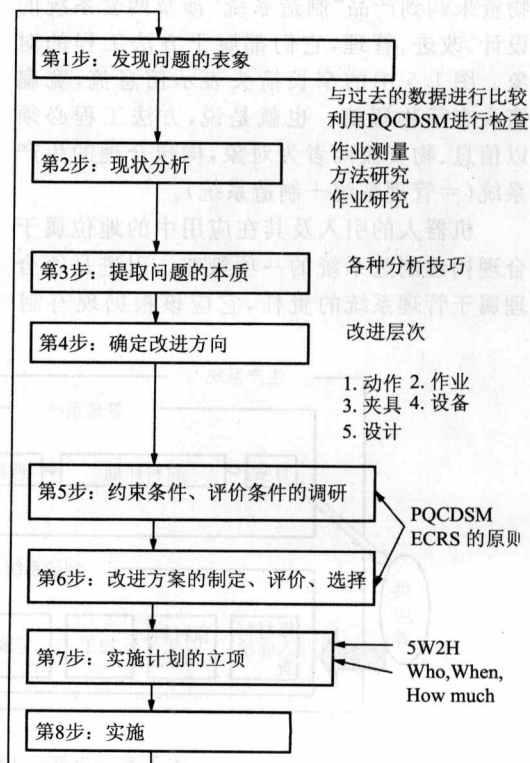


图 1.3 分析方法的基本步骤

图 1.3 中包括这样几个部分:首先是“发现问题的表象”,经过“现状分析”进入“提取问题的本质(Check)”,再经过改进的思考(Action)、改进的立项(Plan)、改进计划的实施(Do)。这个过程可以用图 1.4 的管理循环图来表示。

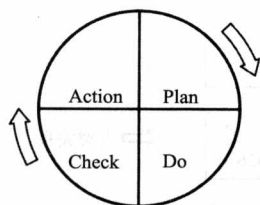


图 1.4 管理循环图

4. 方法工程的管理对象一:生产系统

图 1.5 给出方法工程的管理和设计的对象。

客户在订货时提出的生产要求经过“管理系统”中的交货期(D: Delivery)、质量(Q: Quality)、成本(C: Cost)审核后,供应方(供货者)向客户反馈交货期,同时又生成了原材料、物资(物料)的外购订货信息。供应方从物资采购到产品“制造系统”涉及两套系统的设计、改进、管理,它们都属于方法工程的对象。图 1.5 中的窄长箭头表示信息流,宽扁箭头表示物资流。也就是说,方法工程必须以信息、物资流两者为对象,构建合理的生产系统(=管理系统+制造系统)。

机器人的引入及其在应用中的地位属于合理构建制造系统的一项策略。引进是否合理属于管理系统的责任,它应该根据现有制

造系统的各种能力(时间能力、技术能力)能否满足客户的订货(要求)进行判断。

5. 方法工程的管理对象二:商品寿命周期

下面从产品寿命周期(图 1.6)的角度来考察方法工程。

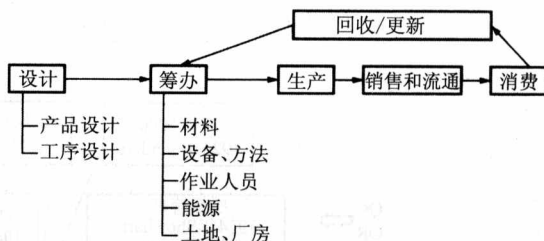


图 1.6 产品寿命周期

通过产品设计和工序设计,将要求的产品功能体现为具体的产品,按照无浪费的目标筹措生产所必需的各种资源(包括材料、设备、作业人员、能源、土地、厂房等),以此开展生产活动,产品进入流通后销售给顾客,最后由顾客进行消费。近年来,开始流行从环境保护的角度考虑的回收和更新,即所谓的反向后勤学。上述过程就是商品的寿命周期。方法工程的管理对象应该囊括该循环过程的所有环节。

由图 1.6 可知,机器人的引入和应用问题机器人属于“设计”阶段(即产品设计)完成之后的“工序设计”(该内容将在本章 1.3 节“制造工序与设计”中进行详细讲解)的内容,并在后面的“筹办阶段”的“方法”部分里得到贯彻实施。

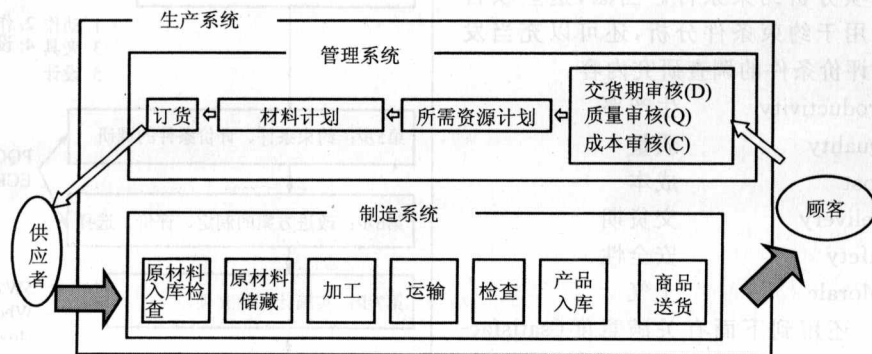


图 1.5 方法工程的管理和设计对象

6. 工业工程

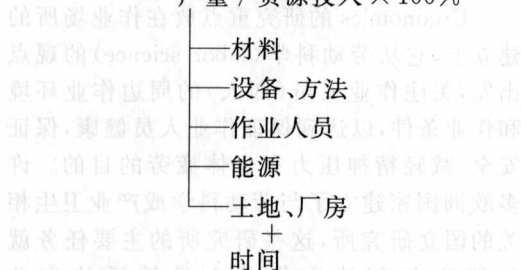
下面是目前最流行的有关工业工程的定义,它由 AIIE(American Institute of Industrial Engineers,美国 IE 协会)给出。

“IE 是指综合人、物和设备而展开的与系统有关的设计、改进和构建的活动,并依据工学分析和设计的原理及方法,借助于数学、物理学、社会学等方面的专业知识和经验,显示、预测和评价该系统所能获得的结果。”这里的工程学(engineering)一词,由美国工程技术认证委员会(ABET: Accreditation Board for Engineering and Technology)给出的定义是“为了探求经济合理地利用自然物质和各种力量为人类造福的方法,对由研究、经验和实践所获得的数理科学和自然科学知识开展评价和应用的专门领域”。这里有“经济地”、“数理科学和自然科学”、“评价应用”三个关键词,对这些关键词加以整理,可以将 IE 的概念表述如下:

“IE 就是在针对人、物、设备和信息所组成的系统开展的设计、改进和再设计活动中,评价和运用工学以及其他所有相关知识,达到高效作业的目的。”

IE 的目的在于根据经济性、兼顾人性和安全性的考虑,谋求生产率的提高。生产率可以用下式表示:

$$\text{生产率} = \text{输出} / \text{输入} \times 100\% \\ = \text{产量} / \text{资源投入} \times 100\%$$



从管理技术的观点来看,提高生产率必须要减少资源的投入。管理技术的各项内容对此都有各自的针对性,例如,“质量管理”有益于节约材料,“制造工艺学(工序的研究)”中的机器人引入有益于设备、方法的调剂,“方法工程”有益于节约劳动力,“设备管理”有益于节省土地和厂房等。

7. 生产率的概念

前面给出了生产率的计算公式,其分母

中(资源投入)包含多项内容,因此要想做到“提高生产率”往往并不容易。例如,我们关注分母中的“材料”一项,就有“成品率、废品率、原材料利用率”等内容,下面列举与各项资源投入有关的各项子指标。

材料:废品率、成品率、原材料利用率

设备、方法:单台设备生产率

操作人员:劳动生产率

能源:按照原来的单位

土地、厂房:每平方米的生产率

时间:单位时间的生产率

为了有效地推进改进工作,非常重要的事情是我们应该将与生产率计算公式的分母有关的各项细分到上面列举的各项子指标中。

吉本一穗

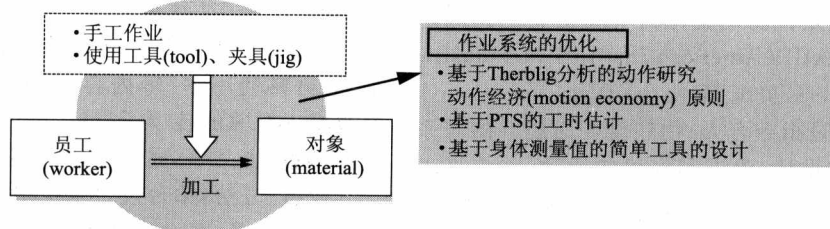
1.2 人机工程学

1.2.1 人机工程学的必要性

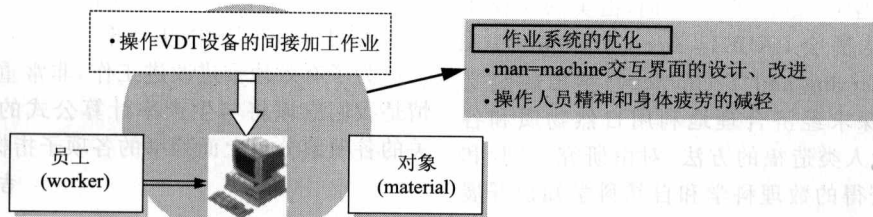
随着 FA(Factory Automation,工厂自动化)化和 OA(Office Automation 办公自动化)化的进程,在生产系统或办公系统中,由作业人员(worker)直接操作加工对象的传统的“手工作业(manual operation)”出现了靠“VDT(Visual Display Terminal 视频显示终端)进行操作,即通过设备间接操作加工对象(VDT operation)”的倾向(图 1.7)。

长期以来,人们都是围绕手工作业开展提高作业效率的方法研究(method study)的。在 F. B. Gilbreth 等开发的 Therblig 分析中,人的动作被概括成 18 种基本动作,它们被分为第 I 类(必要动作)、第 II 类(非直接必要的动作)和第 III 类(无用动作)三大类。动作的改进就是设法排除第 III 类和第 II 类动作。在生产系统中运用 Therblig 分析,可以缩短作业时间,实现生产率的进一步提高。

然而,如果始终假定生产系统的作业主体是作业人员,那么仅靠效率来提高生产率,这样的生产系统肯定是有极限的。换言之,在构建生产系统时围绕员工这个因素需要考虑效率、舒适性等各种问题,例如,作业人员使用工夹具或 VDT 设备的便利程度、持续工作时的情绪和满意度,甚至安全和健康因素等。在这样的背景下确立了人机工程学这样一门边缘学科。



(a) 传统作业系统



(b) FA/OA的作业系统

图 1.7 从手工作业到 VDT 作业

1.2.2 何谓人机工程学

在美国有“Human Factors (engineering)”,在欧洲有“ergonomics”,从这两个学科领域能发现一些人机工程学的发展脉络。

1. Human Factors(Engineering)

1922年,波士顿成立了 Human Engineering Laboratory(人机工程实验室),该实验室的 J. O'Connor(奥康纳)开创了关于手部动作适应性的测试研究,首次使用 human engineering 这个术语^[1]。J. O'Connor 当初使用 human engineering 一词是针对人类动作特性的基础研究领域提出的。

后来,很多研究人员提出了人机工程学的定义。A. Chapanis(恰帕尼斯)的定义是“在设计中任何与人的能力限度和特性有关的科学”。他研究比较了直读式和拨盘式两种不同操作方式对设备信息读取特性的影响^[1]。E. J. McCormic(麦考米克)的定义是“将人的适应性、神经、感觉、精神、体力的相关影响因素应用于机械装置、机器交互界面进行产品、最优作业方法、作业环境等设计的科学”^[2]。

如上所述,美国以第二次世界大战为契机创立的 human factors,当初采用的主要研

究方法是实验心理学技术,其目的在于提高军事装备的操作性能。

2. Ergonomics

Human Factors 创立于美国,而 Ergonomics 则始于欧洲。“Ergonomics”是由“Ergon”=工作,“Nomos”=法则,“ics”=科学这三个词根组合起来而成的英文单词,其意义是“探索有关人作业的法则或规则的学科领域”。

Ergonomics 的研究重点放在作业场所的建立上,它从劳动科学(labor science)的观点出发,关注作业人员(即人)的周边作业环境和作业条件,以达到保证作业人员健康,保证安全,减轻精神压力和身体疲劳的目的。许多欧洲国家建立了与劳动科学或产业卫生相关的国立研究所,这些研究所的主要任务就是研究如何建立作业人员舒适的作业场所^[3]。

如上所述,在美国和欧洲这两个不同的地区,人机工程学以不同的定义形式问世。我们也可以发现二者的区别:美国的 Human Factors 是在人与机器之间的相互关系中探讨“人如何有效地操作机器?”即如何做才有益于人机交互界面的设计、开发和改进。欧洲的 Ergonomics 则从劳动科学的观点出发,追求“人在作业场所中的健康、安全,以及减轻人在劳

动中承受的精神压力和身体疲劳”。可见它们的区别在于其关注点是“人与机器之间的相互关系(交互性)”呢,还是“人”的自身。

目前, Human Factors 与 Ergonomics 之间并没有明确的分界线,应该说,二者的意义大致相同。

3. IEA 的定义

以下是 IEA (International Ergonomics Association, 国际人机工程联合会) 的人机工程学定义:

“Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.”

4. 与人机工程学相关的学科领域

可以说,人机工程学是一门与各种相关技术领域交叉的边缘学科。从小处看,它是事关人机交互界面的设计、开发和改进的问题;从大处看,它涉及员工舒适的工作环境的问题。总之,它是以追求人的高效率、舒适性为目标。例如,与人机界面相关的有人体测量学、生理学、实验心理学、认知心理学等,而与舒适的工作环境相关的有产业心理学、劳动医学、安全工程学、劳动卫生学,以及组织心理学、系统工程学等。

1.2.3 人机工程学的研究内容

下面介绍人机工程学的研究内容。

1. 人机交互界面

交互界面这一术语,在日语中对应着“界面”这两个汉字。人与机器之间的界面就是人机交互界面,也就是指操作机器时作业人员(人)向机器输入命令等信息所使用的界面(输入设备),或者机器向人提供的对操作机器有用的信息界面(显示设备)。

第二次世界大战期间, A. Chapanis (恰帕尼斯) 和 P. M. Fitts (费茨) 等对飞机机载设备的读取速度和读取精度进行了深入的研究,在美国建立起 human factors 的基础理论^[4]。以飞机操纵为例,飞行员操纵飞机的输入界面实际上是“操纵杆”,而向飞行员提供飞机

高度、转角、升降角度、飞行速度的界面实际上是“仪表板”。也就是说,如果操纵杆能够按照飞行员的意图进行操纵,再加上能够迅速、准确地读取指示速度和高度的仪表,那么就能够提高飞机操纵的效率,减轻飞行员,即人的疲劳和精神负担,从而提高舒适性。随着 OA 化、FA 化的发展,基于计算机的 VDT 机器操作的人机交互界面的研究已经取得很多成果。下面我们以 VDT 设备为例来说明人机交互界面的效率和舒适性与人机工程学之间的联系。

1) 输入设备

VDT 设备的输入部分主要有键盘和鼠标。我们应该从人机工程学的角度开展键盘操作性的研究。例如,键的大小、排列方式对输入时间和输入错误都会产生影响。键盘的形状会对操作人员的心理或身体产生影响(尤其对颈部、肩部、腕部等)。鼠标是一种点击指示工具,为了提高指针移动、视点坐标定位等方面的操作便利性,人们开展了有关鼠标的许多研究。

特别以输入时间为例。根据图 1.8 所示的模型,对于“感受器(感觉器官)”接受“刺激(信息)”,到“执行器(运动器官)”完成“反应(行动)”的过程,就应该从“知觉系统”、“认识系统”、“运动系统”等多个方面开展人机工程学的研究。

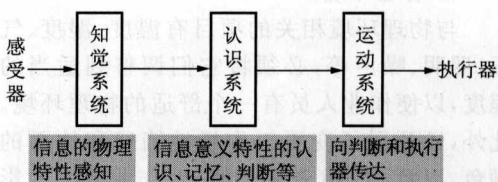


图 1.8 知觉、认知信息处理的过程

2) 显示设备

VDT 中的主要显示设备有 CRT、TFT 等显示器,并以 Windows OS 或 X Window System 的典型界面形式 GUI (Graphical User Interface, 图形用户界面) 表示在显示器上,它以鼠标操作命令为主。有关 GUI 的效率、舒适性方面的研究主要涉及显示文字和图标的大小、颜色、应用程序菜单层次的易用性等。

2. 人体测量

在人机交互界面设计中不可或缺的一项

内容是人体测量值。即使是办公室的桌椅尺寸设计这样简单的问题,也必须在大量人体测量数据库的基础上才能做出。当然,性别差异和年龄差异会引起人体测量数据库中数据的变化,因此在利用数据库时应该注意。此外,即使是性别、年龄相同,仍然存在着“个体差别”,因此必须事先以官能检查(方便性或疲劳感等主观评价)和从身体信息获得的特征值为依据,向用户提供高效率 and 舒适的设计值。

正常活动范围(normal working area)和最大活动范围(maximum working area)的制定方法也是以人体测量值为基准的。保持肘部轻微弯曲的状态,放平手部以35~45cm的半径画弧,该区域内部称为正常活动范围。然后,伸出肘部,以55~65cm的半径画弧,该圆弧的外围区域称为最大活动范围。通常,人们在正常活动范围内进行正常作业,用于其他区域作业的工夹具、机器设备等大多布置在最大活动范围内。

3. 人机系统

以人机交互界面为研究对象时,重点的研究内容在于“人与机器之间的相互关系(交互性)”,不过此时也有必要研究人(作业人员)和设备周围的物理环境,或者作业方法对作业人员产生的影响。

1) 物理环境

与物理环境相关的项目有温度、湿度、气压、照明、噪声等,必须将它们调整到适当的程度,以便作业人员有一个舒适的物理环境。此外,还开展了变更工作场地墙壁和地面的颜色,以及BGM(音乐环境)对作业效率的影响的研究。

2) 作业方法

在FA化、OA化的生产系统中,由于作业与DVT设备的操纵有关,因此对作业方法的研究涉及作业标准化(手册化),以达到提高作业效率的目标。

在机器人与作业人员协调作业的现场,如果操纵者出现了人为错误,可能会使机器人与作业人员发生碰撞,造成人员伤害。为了避免事故的发生,有人建议采用“傻瓜操作”或“容错结构”的方法^[6,7]。

所谓傻瓜操作就是从一开始就按照无人

为误操作的原则来构建系统。例如,在印刷机中,只有当左、右手手指同时按下两个开关时才能运转,这样就能够避免误动作带来的危险。

所谓容错结构就是在系统处于异常状态时,可以启动备份功能使系统恢复正常,从而避免系统发生其他异常状态。喷气客机就设置了多重液压系统,如果某一个系统发生了故障可以由其他系统进行替代,这也就是所谓的“冗余”结构。

4. 工作场所的环境

除了针对人机交互界面、人机系统外,提高生产系统的效率和舒适性的研究还应该从员工修养、职业满意度、安全和健康状态等各个方面着手。如果员工的修养或职业满意度较低,往往很难确保工作场所的安全,甚至会对他们的健康造成损害。

1.2.4 人机工程学的发展趋势

前面对人机工程学产生的脉络和研究领域进行了介绍。人机工程学创立初期,其主要的研究领域集中在人机交互界面,即对象的层面上。目前,员工作业的物理环境、心理环境开始被纳入研究对象,于是有关人机工程学的研究就进入了围绕以人(员工)为本的核心来追求生产系统的效率和舒适性的时代。

人机工程学进一步的发展趋势是引入无障碍设计和通用设计的理念,它的意思是考虑高龄、残障对功能和能力的影响因素,完善人机交互界面的设计。通用设计是R. Mace等提出的,是指“为大众共用的设计”概念,它由以下七个原则构成^[8]:

① 任何人都能平等使用=equitable use,即不排斥任何人,并且不对任何人造成伤害的设计。

② 使用的柔性=flexibility in use,即可以按照个人的爱好和能力加以利用的设计。

③ 可以简单直观地使用=simple, intuitive use,即与用户的经验、知识、语言能力、意识水平无关,使用简单易懂的设计。

④ 易于识别信息=perceptable information,即与周围环境、用户的感觉能力均无关,能向用户有效地传递必要信息的设计。

⑤ 容错操作=tolerance for error,即将由不经意或无意识操作引起的事故或有害影响控制在最低限度的设计。

⑥ 节省体力的操作=low physical effort,即可以高效、舒适地使用,不易引起疲劳的设计。

⑦ 留有足够的进入或使用的尺寸和空间=size and space for approach and use,即与用户的身体、体态、移动能力无关,只要保证可以操作的外形尺寸和空间大小即可。

西口宏美

1.3 制造工序设计

为了顺利地开展生产活动,必须在考虑产品设计技术因素、经营因素(产品需求、成本等)的基础上制定工艺方案(工序的计划)。这里所谓的工序是指进行生产的基本单位,使工序顺畅化的工作就是工序设计。

1.3.1 生产工序和工序设计

以下是工序(production process)的定义:

“工序是赋予材料物理、化学变化,以获得期望性状的作业序列中的基本单位”。工序的内容有场所和部门,连接起来的工序被称为工序系列。这里所说的“期望性状”是指产品所要求的质量、日程、成本水平,以及工序产生的附加值。

图1.9给出了围绕工序的输入/输出状况。从3M(即 Man, Machine, Material)所代表的输入,直至输出产品,其间可以得到许多对工序设计而言有效的信息。

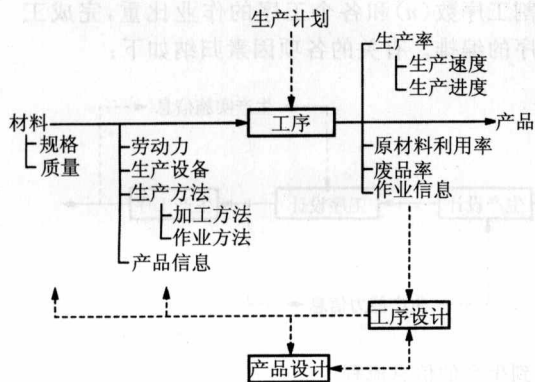


图1.9 构成工序的要素

1. 工序设计

“工序设计(process design)是指在产品生产过程中,为了满足产品设计阶段所确定的产品质量、产量、交货期等约束条件,进行加工方法、作业方法、生产设备、工夹具等要素设计或选择的过程。

产品设计主要根据机械工程学的理论来展开,其结果体现在获得满足产品功能要求的设计图纸上。

工序设计涉及构成整个生产活动的各种条件,可以说它是将设计图纸转换成产品的最优方法的设计。工序设计就是在给定条件下,为了取得最佳效果,对生产诸要素进行整合的过程。若产品设计本身发生变化,那么工序设计的对象——加工方法、生产设备等也不得不随之发生改变。这里必然涉及管理工程学、机械工程学的知识。

应该根据销售计划、库存计划的需要来决定产量和生产时间,即生产计划。近年来,制定生产计划的趋势是依据按订单生产(BTO: Build To Order)和现货生产(MTS: Make To Stock)的原则。计划能否实现是可以从工序所具有的能力计算出来的,因此在制定生产计划时必须清楚地了解生产能力。实际上,决定生产计划的因素就是工序设计的约束条件。

2. 工序设计的方案

在进行工序设计时,为了满足功能的要求需要对多种因素(人、物、设备、事件、质量、金钱)进行考虑,甚至包括经营因素在内,制定若干个可行的实施方案。显然无法依据某一个尺度对这些方案进行比较和选择,但可以从质量、投入量之间的关系选择一个恰当的解。多个尺度可以提供更多的选择可能性,体现出工序设计能够给予工序多大程度的柔性(能力)。

1.3.2 工序设计的环境

进行工序设计时必须充分理解在由功能设计阶段中确定的具体性能规格和满足这些性能规格所必需的产品的功能、质量、使用条件,记忆在使用条件下产品性能的意图、生产活动结果等,从而确认约束条件。

当前,生产活动的主要形态正经历着从人向自动化设备的演变过程,自动化设备的方便性也是改善工序设计环境的重要方面。

1. 工序设计的约束条件

在具体制定工序时必须详细掌握材料的组成、机械性质、加工性能,了解加工方式对产品性状的影响。工序设计总是受到前、后各个阶段的计划、设计的制约。下面就一些典型的约束条件,如生产设计、工序能力、生产形态、标准化进行说明。

1) 生产设计

图 1.10 给出了设计从构想向实施转移的过程。

功能设计结束之后即进入工序设计阶段。将功能设计图纸向可生产状态转换的过程依赖于生产设计。即生产设计为工序设计提供“制造便利性”的问题。工序设计必须提供一些信息,把各道工序的技术能力限度传递给生产设计,并让时间能力状况达到最佳状态。

2) 工序能力

工序能力就是工序所具有的潜在能力,它包括以下两个方面:

① 时间能力;

② 技术能力。

时间能力就是单位时间内生产产品的最大数量,可以通过缩短工时数来减少所需的总时间。改变作业分配方式,更改作业时间也能提高时间能力。有人认为,实际上产品的出库速度也是一种可以按需要调整的“性能”。通过生产计划来调整的能力主要就是指时间能力。

技术能力是决定材料和产品质量水平的

能力,它的外在表现就是加工误差、废品率、原材料利用率等。变更设备、机器的设计可以提高技术能力和生产率,降低生产成本,进而完善作业方法,稳定作业时间和产品质量,以达到与上述相同的效果。

3) 生产形态

订货情况、生产品种、数量不同,应该采取的生产形态也不同。如果用图表示各种生产形态的比较,则如图 1.11 所示。

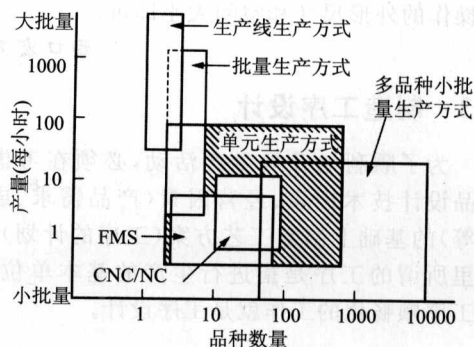


图 1.11 各种生产方式的比较

(1) 生产线生产方式 按事先估计的需求量进行生产,通常都属于少品种大批量生产,其产品的性能、规格靠厂家决定。为了提高生产率,在工序设计中经常采用多轴、多头、多刀、仿形工具和组合机床之类的专用设备。

工序的形态采取各个工序排列的生产线生产方式,按照完全自动化(采用专用设备)和作业来分割编制工序。为了能满足所要求的生产速度(C_r),以及最大限度地发挥在给定时间内的生产能力,在生产线生产的设计中要分割工序数(n)和各个工序的作业比重,完成工序的编排。有关的各项因素归纳如下:

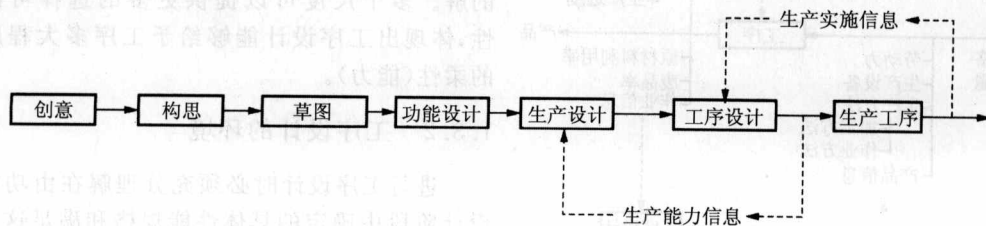


图 1.10 产品从立项到生产的信息流程

所要求的生产速度 C_i 为

$$C_i = \frac{T}{N}$$

式中, T 为加工时间; N 为目标生产数量。

必要的工序数 n 为

$$n = \frac{\sum t_i}{C_i}$$

式中, $\sum t_i$ 为总工时数。

在生产线上生产的工序设计中, 生产线的平衡方法非常有效。

如果生产品种增加, 为应付生产的多样性可以采取几种措施, 如生产线的复合, 即生产线的形式能够进行转换, 或者混合等。

(2) 单元生产方式 面向中等品种中批量生产的工序设计可以采用类似于成组技术 (GT: Group Technology) 的工序方式, 建立单元工序。目前的趋势是向柔性加工单元 (FMC: Flexible Manufacturing Cell)、柔性加工系统 (FMS: Flexible Manufacturing System) 发展。

(3) 多品种小批量生产方式 大多数按订单生产均为多品种小批量生产。此时工序设计的特点在于集中配置能够应对多种零件的生产设备 (通用设备)。通常, 提高生产率的措施有 NC 自动化、零件通用化、加工路线分解等。

4) 标准化

标准化是决定工序设计的基本因素, 是所有的生产活动都应该遵守的原则。显而易见, 标准化有利于稳定产品质量, 减轻通用零件造成的作业负担, 平衡作业性能, 减少零件数量, 降低成本, 作业通用化和简化采购等。

2. 自动化

生产工序就是一个人机系统。其间员工操作工具和机器, 得到输出结果——产品。其主体是人。鉴于工资昂贵、安全性等问题, 推进设备自动化可以有效发挥人的判断能力, 从而节省人力。

在机械化和具有判断功能的自动化设备的基础上, 将工业机器人引入自动化是顺理成章的事情。进行工序设计时应该首先考虑有效利用人的能力 (柔性、意识判断力、安全性), 然后再充分讨论机械化、自动化的优点和局限性, 制定替代方案。

1.3.3 工序设计的精度

自动化设备的精度提高以后, 不但对结构零件的互换性, 而且对结构材料, 甚至对加工设备的精度都提出了更高的要求。这样一来往往会造成加工成本的显著上升, 给工序设计带来严重的制约。

从工序设计的角度来看, 高质量、高效率地生产产品是非常重要的。因此, 除了提高设备的精度外, 还需要考虑以下几点:

1. 提高工件的精度

提高工件的精度增加了加工制造的困难, 但也带来了一些好处, 如产品质量的改进、简化了装配等。

2. 面向生产的工件设计

只要不影响产品的质量, 为了提高生产率可以适当考虑变更工件的设计, 甚至允许在进行工件设计时预留余量以方便加工, 只要最终将其去除即可。

3. 提高工夹具的精度

用工夹具固定工件毛坯时最好把加工基准与工件设计基准取成一致。自 1980 年开始, 人们就着手研究形状亲和性 (即工件与设备的相容性) 对加工精度的影响。

4. 设备安装精度

设备往往不是单独使用的, 在很多情况下需要保证它与周边设备之间的位置精度, 以便提高整个系统的精度。

堀内正彦

1.4 设施的设计

方法设计的内容是通过动作设计、设备周边作业方法设计, 以及图 1.12 所示的两种设施设计 (设施计划: 与物流有关的工件存放位置、设施总体布局的设计) 具体体现的。

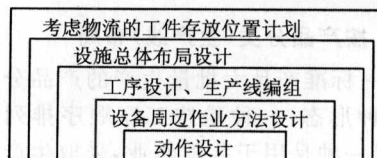


图 1.12 设施设计的内容

一般来说,所谓设施是指创造“产品或服务”的场所,它不仅包括工厂,还有办公室、医院、图书馆等公共设施等。在引进和应用机器人时并未限定生产场所,因此也可以算是一种广义的设施。所以,设施的概念是相当广泛的。

1.4.1 设施设计的周边技术

设施设计不是独立的,它受到图 1.13 所示的周边技术的制约。

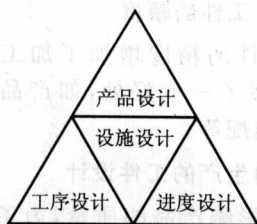


图 1.13 设施设计的周边技术

“产品设计”是解决做什么的问题,“工序设计”解决如何做的问题,而“进度设计”则是判断做多少才能满足库存的问题,这三个方面的信息确定了设施的特色和规模。

决定生产系统布局类型的基础是产品-产量(P-Q: Product-Quantity)分析,如图 1.14 所示。

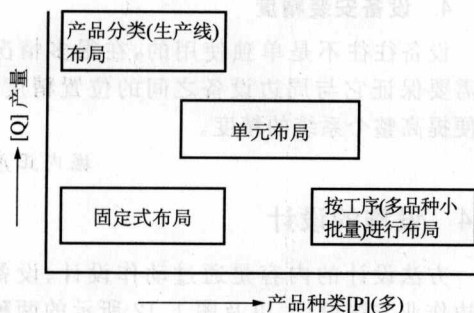


图 1.14 生产系统布局的类型

1.4.2 布局类型

1. 按产品分类(生产线)布局

单一标准产品大批量生产的产品分类布局有两种形态:一种是按工序顺序排列专用设备;另一种是用于装配作业,采取生产线布局的形态。此时,如果打算采用机器人,那么可以选择缩短生产周期的装配机器人或焊接机器人等。

2. 固定式布局

如果产品的产量和品种都不多,例如,船舶制造或大型机床制造,那么应该采取将工件固定在特定场所,将材料、设备、员工集中起来进行生产的作业形态,这就是固定式布局。由于受到生产方式的限制,因而机器人的应用也受到限制。

3. 按工序(多品种小批量)进行布局

按工序(多品种小批量)进行布局也称为功能式布局,它适合多品种产品生产工序,是将具有相似功能的工序、设备集中在一起配置的方式。此时机器人的主要作用在于担负设备与设备之间工件的运输和装配。

4. 单元布局

根据零件与加工设备之间的关系进行编组,构成一个“组”。每一组集中所必需的设备形成一个“单元(cell)”,在单元内物流采取封闭的形式,称此种布局方式为单元布局。

设计布局形式时,应该根据产品特性、加工特性进行设施的优化设计。

1.4.3 设施布局的方法

为了能够系统地实施设施规划, Richard Muther 提出了 SPIF(Systematic Planning of Industrial Facilities),他将设计规划分为五个组成部分,并开发了各个部分的设计方法,下面对其进行说明。

1) 布局规划

SLP(Systematic Layout Planning)。

2) 运输规划

SHA(Systematic Handling Analysis)。

3) 效益规划

SUA(Systematic Utility Analysis)。

4) 交通规划

SCA(Systematic Communication Analysis)。

5) 建筑规划

SBP(Systematic Building Planning)。

车间和设备的布局除了对物料(材料、型材、产品)运输、支持生产的效益(动力)、生产指标和业绩报告信息的设计等进行通盘考虑外,还必须结合建筑规划一起进行决定。因此,在设施布局的规划阶段,这 5 个组成部分密不可分,它们必须相互融合,并对它们作出

整体规划。

布局规划是所有设施规划的核心内容,布局规划通常采用的方法是 SLP,它成为随后开发的各种布局技巧和数理技巧的基础。

SLP 所需要的输入信息,即进行设施布局设计时所需要的信息如下:

P: Product 产品、服务
Q: Quantity 数量
R: Route 工序、过程
S: Service 服务、效益
T: Timing 时间、时期

设施布局分为以下几个阶段:①厂区内建筑物的布置;②建筑物内场地的布置;③场地内设备的布置;④设备周边动作区域的布置。SLP 所处理的阶段为其中的 ① ~ ③。

1.4.4 SLP 概述

SLP 的执行步骤如图 1.15 所示。布局涉及的对象除了设备、台案、出入通道之类的物质因素外,还包括风向、采光等无形因素,它们统称为活性因素。

流程的展开示意由图 1.16 ~ 图 1.19 给出。

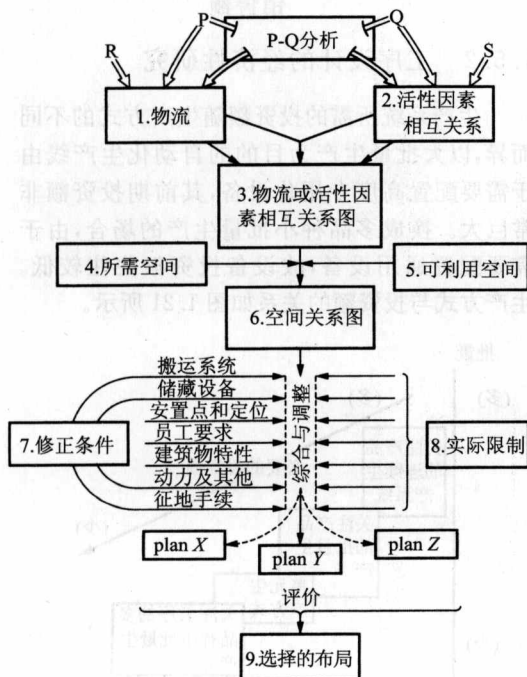


图 1.15 SLP 概略框图

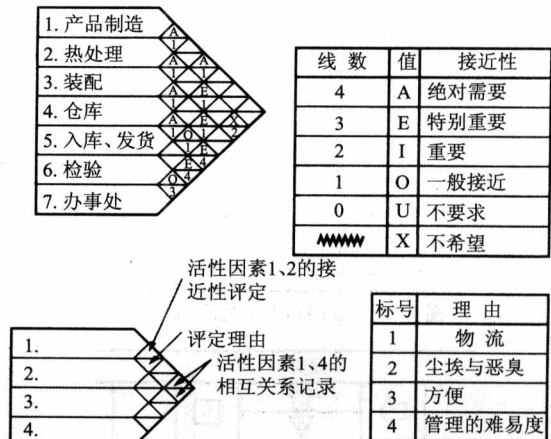


图 1.16 活性因素的相互关系

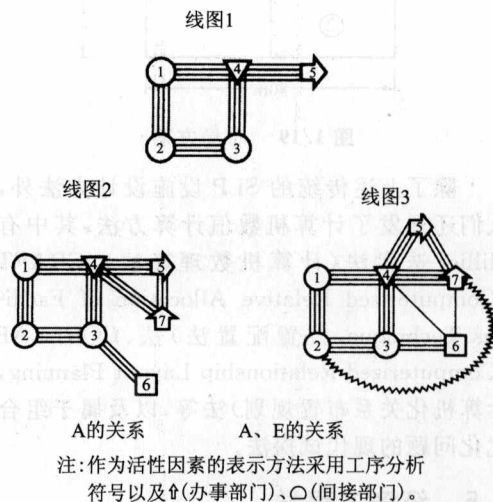


图 1.17 相互关系图

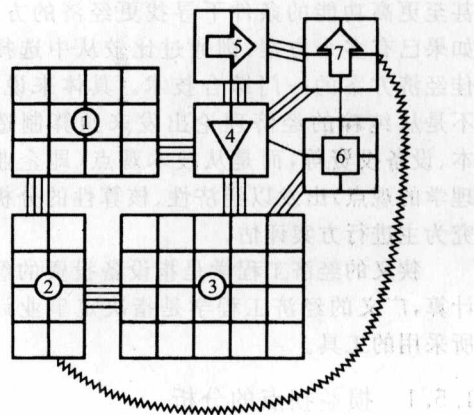


图 1.18 面积相互关系图

活性因素	面积/m ²
1. 零件制造	1200
2. 热处理	800
3. 装配	2000
4. 仓库	400
5. 入库、发货	400
6. 检验	400
7. 办事处	400
合 计	5600

图 1.18 面积相互关系图(续)

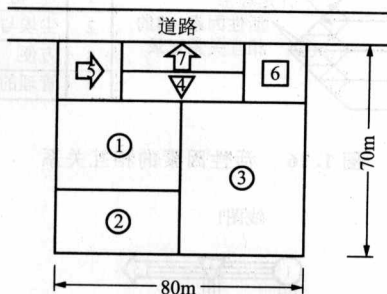


图 1.19 布局方案

除了上述传统的 SLP 设施设计方法外,人们还开发了计算机数值计算方法,其中有 Hillier 迭代法(计算机数理算法)、CRAFT (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique, 位置配置法)法、CORELAP (Computerized Relationship Layout Planning, 计算机化关系布置规划)法等,以及属于组合优化问题的现代试探法。

1.5 经济工程学

所谓经济工程学就是在满足给定功能,甚至更高功能的条件下寻找更经济的方案,如果已有多个方案,则通过比较从中选择最佳经济方案的一门综合技术。具体来说,它不是从纯粹的经济理论出发来预算制造成本、设备投资等,而是从技术观点(即企业管理学的观点)出发以经济性、核算性的分析研究为主进行方案评估。

狭义的经济工程学是指设备投资的经济计算,广义的经济工程学是指决定事业计划所采用的工具。

1.5.1 损益拐点的分析

损益拐点分析即对费用(cost)、(设备)负荷系数(volume)、利润(profit)三者加以综合考察的研究方法,也称为 CVP 分析。其概念

如图 1.20 所示。

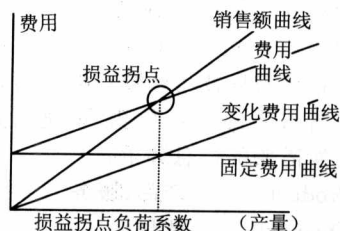


图 1.20 损益拐点分析

假设 1 个单位产品的销售额为 1 个单位,则“销售额曲线”可以用 45° 的直线来表示,而费用曲线由不生产任何产品均需要支付的“固定费用”和与产量成正比增加的“变化费用”两个部分构成。两者的交点即为企业的损益拐点,此时的产量称为损益负荷系数。企业的经济性判断和改善方向就是设法压低损益负荷系数,获取利润。

损益负荷系数的计算公式为

$$\text{损益负荷系数} = \frac{\text{固定费用}}{\text{销售单价} - \text{单位变化费用}}$$

损益拐点销售额可以表示为

$$\text{损益拐点销售额} = \frac{\text{固定费用}}{1 - \frac{\text{变化费用}}{\text{销售额}}}$$

1.5.2 工序设计的经济性研究

生产系统所需的投资额随生产方式的不同而异,以大批量生产为目的的自动化生产线由于需要配置高度专用化设备,其前期投资额非常巨大。换成多品种小批量生产的场合,由于需要配置通用设备,故设备投资额往往较低。生产方式与投资额的关系如图 1.21 所示。

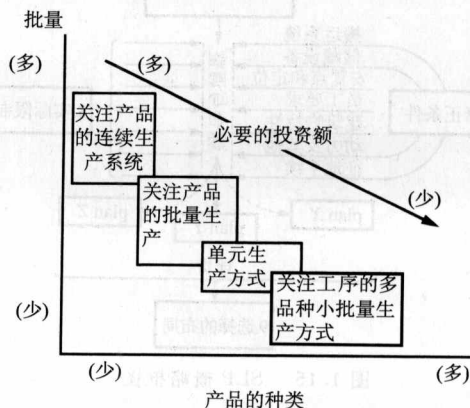


图 1.21 生产方式与投资额的关系

在工序设计类型的评价、选择过程中,可以根据损益拐点分析绘制成本函数,作为经济性评价的依据。示例如图 1.22 所示。

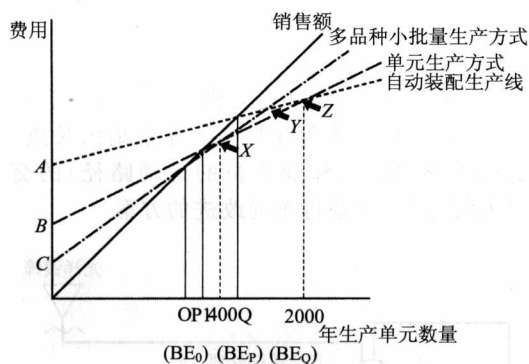


图 1.22 工序设计类型与经济性的研究
(成本函数及损益拐点分析)

构建含有大量机器人的自动化生产线往往需要开发专用生产线,因此其固定费用(A)相当昂贵,但是1个单位产品生产所需的变化费用却很少,其成本函数是一条平缓的直线。反之,多品种小批量生产型前期投资额的固定费用水平较低(C),但是与变化费用相关的成本函数的斜率却很陡。引入损益拐点分析方法,并与45°销售额曲线进行比较,即可进行损益拐点负荷系数的判断,找出各种生产方式的成本函数的交点,这样就可以对适合的生产方式作出选择。在本示例的场合下,从交点Z开始,即超过2000个单位的生产数量后自动装配生产线比单元生产方式有利,类似地,当超过1400个单位的生产数量后单元生产方式比多品种小批量生产方式更有利。

1.5.3 资金的时间价值与经济性评价

观察设备投资的实际情况,发现资金会在三个时段体现出价值,即投资所需的“当前=现价(P)”、投资回收的“每年=年价(M)”、所有活动“完成时=终价(S)”。这样区分的理由是出于对利息的考虑,如“当前=现价(P)”的100万日元,与5年后的“终价(S)”的100万日元的价值是不同的。上述关系用公式表示后就产生利息计算公式。

$$\text{终价} = \text{现价} \times (1+i)^5$$

利用上述公式,即可以通过计算对设备投资的经济性作出评估。

借助于计算可以评估年度回收投资资本的最佳比例,即计算年度回收额的值的公式为

$$\text{年度回收额} = \text{现价} \times \text{资本回收系数}$$

相反,如果改善效果(年度回收额)符合预期,则许用资本投入额的计算公式是

$$\text{资本投资额} = \text{年度回收额} \times \text{年金现价系数}$$

上述系数可以由利息率(i)和年限(n)进行计算,并以数字列表的形式给出,下面举例说明用于经济计算的基本公式:

$$\text{终价系数} \quad [P \rightarrow S]_n^i$$

$$\text{现价系数} \quad [S \rightarrow P]_n^i$$

$$\text{资本回收系数} \quad [P \rightarrow M]_n^i$$

$$\text{年金现价系数} \quad [M \rightarrow P]_n^i$$

$$\text{年金终价系数} \quad [M \rightarrow S]_n^i$$

$$\text{偿债基金系数} \quad [S \rightarrow M]_n^i$$

式中, P 为现价; M 为年价; S 为终价; i 为利息率; n 为年限。

1.6 面向技术人员的定量方法论

为了提高生产率,可以借助于一些典型的工业工程(IE)方法。

按照作业对象进行分类有如下几种:

- (1) 运行 产生附加值的作业。
 - (2) 准运行 利用现有系统无法消除这种作业对象,但进行大幅度改造系统后可以去除。
 - (3) 非运行 不产生附加值的消耗作业。
- 其中,非运行劳动和准运行劳动是提高生产率时需要改善的对象。

1.6.1 工序分析

1) 目的

工序分析是进行工序设计和改进的一门技巧,它的目的是在时序上把握生产现场的物料转移即“工序”和操作人员的行为即“作业”,实现制造过程。它的方法有用于企业主要产品详细分析的工序分析、用于中等品种中等批量生产分析的 Goes-Into Chart、用于多品种小批量生产分析的 From-To Chart 等。下面给出典型的工序分析。

2) 方法

工序分析可以采用 JIS/ASME 规定的基本符号、复合符号、辅助符号(详细情况请参阅 JIS)来进行分析,并根据以下观点进行改进活动。

运行:加工(○)。

准运行:检验(□),运输(⇨),储藏(▽)。

非运行:等待(D)。

3) 案例分析

图 1.23 给出了一个镀金工厂的生产工

序分析实例。

1.6.2 流程图分析

流程图分析是对工序进行连续分析的方法。

1) 目的

给予工序分析中无法获得的距离概念和空间概念,从视觉角度观察运输距离的长度、运动线路(物资、作业人员的运动路径)的交叉和复杂性,以获得布局改进的方案。

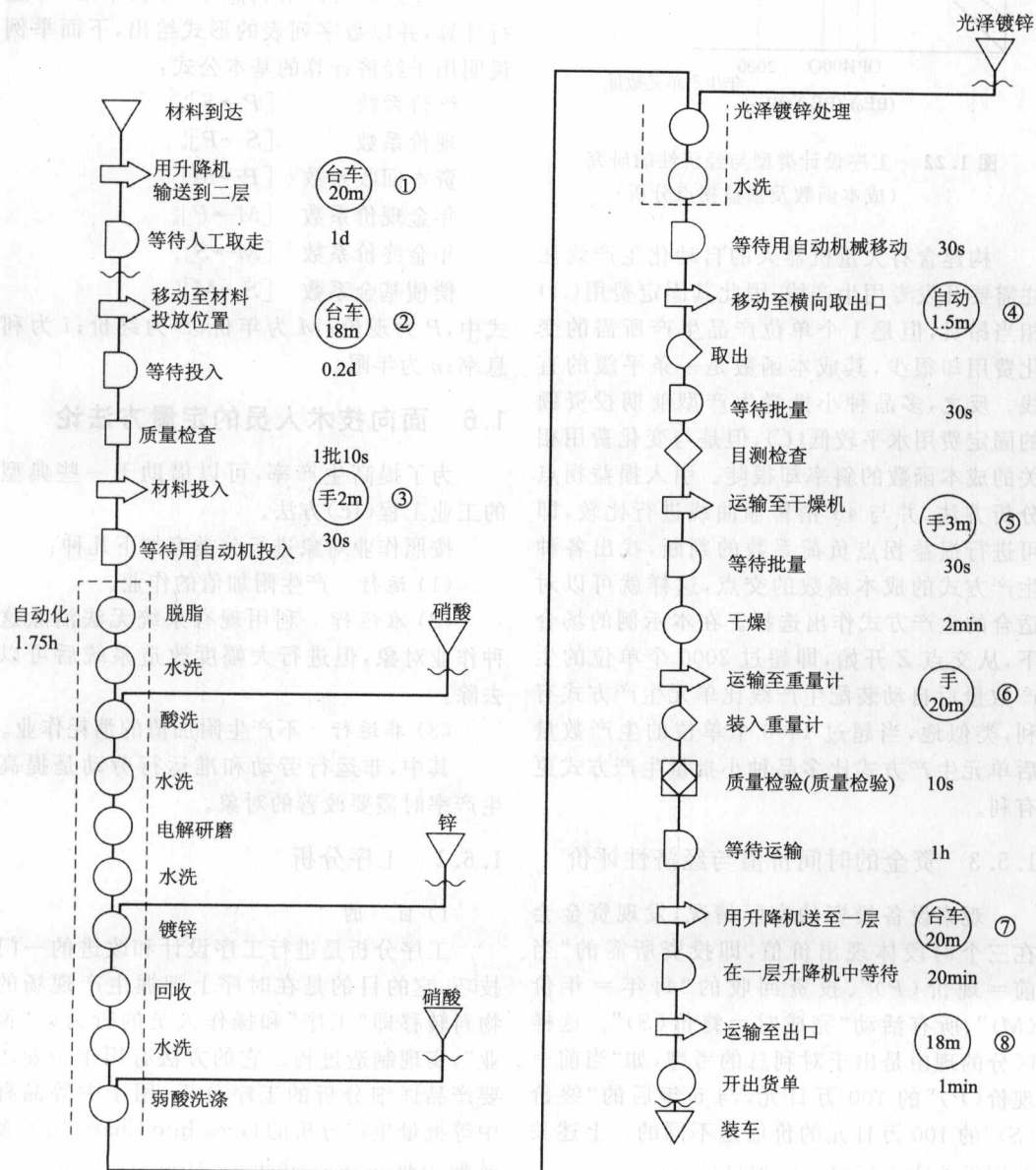


图 1.23 镀金工厂的工序分析实例

2) 方法

在制造工序的布局图纸上展开工序分析,同时画上运输路径(运动线路)。为了表示运动频度和数量,可以改为线型(一般按照频度选择粗细不同的线型)表示。

3) 案例分析

图 1.24 所示为分析实例(电镀工厂的流程图)。

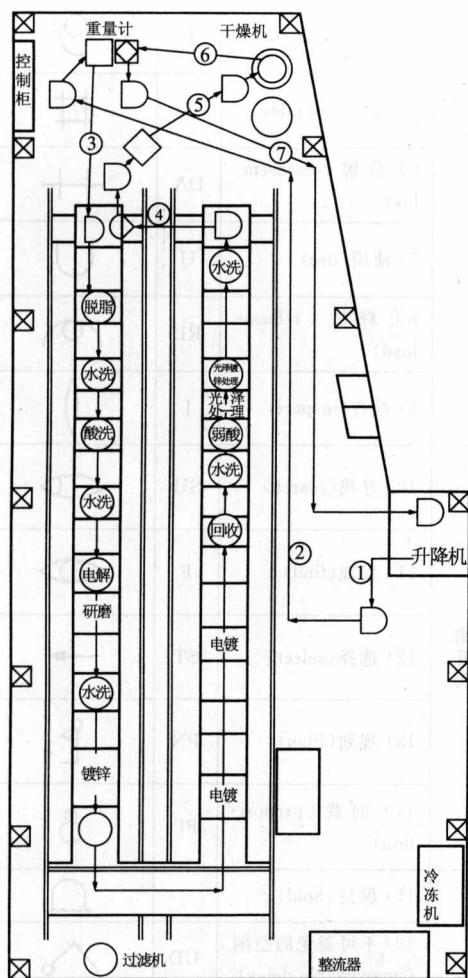


图 1.24 电镀工厂的流程图

1.6.3 运行分析

1) 目的

我们来观察包含人或机械设备在 1 日内作业的生产和非生产要素,然后设法改善劳动的状况。改善劳动状况的典型任务如下:

- ① 确定人员和设备的适当数量。
- ② 改进、调整、清理善后工作。

③ 标准时间和剩余时间的研究。

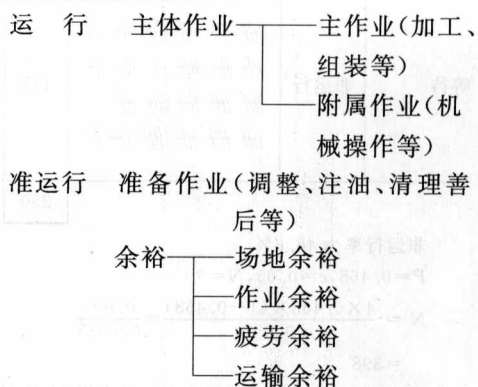
④ 减少员工和机械设备的空闲等待。

⑤ 最佳作业比例的研究。

2) 方法

有两种运行分析的方法:一种叫做“连续运行分析”,在选定作业人员和机械设备后采取一对一的、连续的观测和分析;另一种叫做“工作取样”,采取抽样检查(取样)的形式进行分析。工作取样又根据取样方法的不同分为等间距采样和随机取样两种。

在分析作业人员的运行状况时,可以将作业按照类别分类如下:



非运行 作业之外的行为(闲走、闲聊、空闲、怠工等)

根据上述分类方法即可核实、分析、检查作业行为。

3) 案例分析(工作取样)

表 1.1 所示为电镀工厂的分析实例。

表 1.1 工作取样(分析对象:5人)

项目	区分	样本数	合计	%
筛选	运行	///	7	2.8
空箱搬运	准运行	/// /// ///	21	8.4
材料台车的移动	准运行	//	2	0.8
产品台车的移动	准运行	//	2	0.8
记账		///	4	1.6
材料搬运	准运行	/// /// ///	23	9.2
水(软管)洗	准运行	///	9	3.6
干燥后产品搬运	准运行	/// ///	14	5.6

续表 1.1

项 目	区 分	样本数	合 计	%
质量检验	准运行	### /	6	2.4
产品取出	准运行	### //	7	2.8
上色	运行	### ///	9	3.6
空袋清洗	准运行	### //	7	2.8
投入干燥机	准运行	### ///	8	3.2
原材料投入和检查	运行	### ///	8	3.2
商议	准运行	### /	6	2.4
等待	非运行	### //	117	46.8
			250	

非运行率为 46.8%

$P=0.468, e=0.05, N=?$

$$N = \frac{4 \times 0.468 \times (1 - 0.468)}{0.05^2} = \frac{0.995}{0.0025}$$

=398

设定取 400 个样本, 已经取出 250 个样本, 故还应该再取 150 个样本。

1.6.4 动作分析

员工作业的最小单位就是动作, 把运动意图在动作这一层次上加以分解和改善, 是工业工程的基本内容。

1) 目的

通过对一个工作循环所发生的手或眼的运动进行分析, 消除无用动作, 建立起节约体力的经济动作的顺序和组合。

2) 方法

通过对制造工序或作业方法过程的研究, 改进形成大致方案后, 再对特定作业作细致的改进, 然后采用 Gilbreth 提出的基本动作要素符号加以记述。人的动作可以用 18 种基本动作要素进行分析, 其中第 II、第 III 类基本动作要素是改进的对象。这一想法与减少准运行、非运行的工业工程方法是一致的。基本动作要素符号如表 1.2 所示。

表 1.2 基本动作要素符号(Gilbreth 的基本要素)

类 别	基本动作要素	缩 写	符 号
第 I 类	1) 空手移动 (transport-empty)	TE	
	2) 抓取 (grasp)	G	
	3) 重物移动 (transport-loaded)	TL	
	4) 定位 (position)	P	
	5) 装配 (assemble)	A	
	6) 分解 (disassemble)	DA	
	7) 使用 (use)	U	
	8) 释放 (release-load)	RL	
	9) 检查 (inspect)	I	
第 II 类	10) 寻找 (search)	SH	
	11) 发现 (find)	F	
	12) 选择 (select)	ST	
	13) 规划 (Plan)	PN	
	14) 前置 (preposition)	PP	
第 III 类	15) 保持 (hold)		
	16) 不可避免的空闲 (unavoidable delay)	UD	
	17) 可避免的空闲 (avoidable delay)	AD	
	18) 休息 (rest for overcoming fatigue)	R	

第 I 类: 完成作业所必需的要素(运行); 第 II 类: 此类动作有推迟第 I 类动作要素的趋势(准运行); 第 III 类: 不执行作业的动作要素(非运行)。

3) 案例分析(图 1.25)

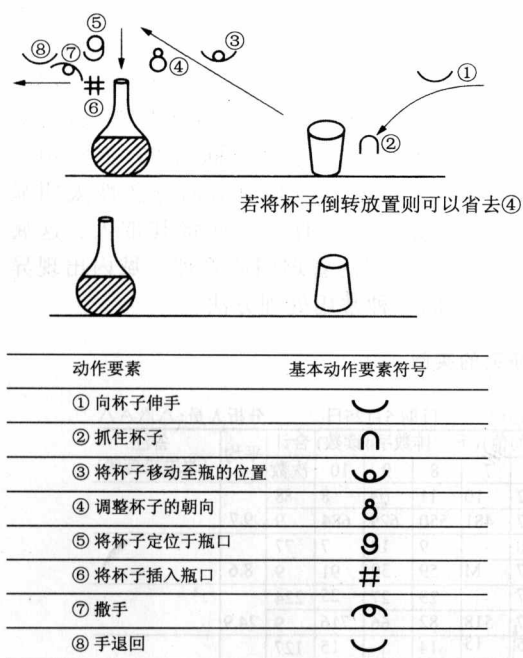


图 1.25 基本动作要素符号的分析实例

1.6.5 复合活动分析

复合活动分析就是用图表分析在执行某项作业时人与机械或人与人的复合过程,即用图标分析复合活动时间同步性的方法。

1) 目的

发现在人与机器或人与人的组合作业中的空闲时间,以达到提高作业效率的目的。下面举例进行具体说明。

- ① 发现员工、设备的空闲时间。
- ② 进行更有效的作业分配。
- ③ 确定每位员工管理设备的台数。
- ④ 确定编组作业的最佳人数。

2) 方法

作业内容可以分为作业、准备、空闲(分别对应于运行、准运行、非运行),采用表 1.3 所示的标记方法,以纵轴作为时间轴制成图表进行空闲时间的研究,分析每位员工的最佳管理设备台数。

3) 案例分析

这里以 1 位作业人员操作 3 台设备为例进行说明。由于设备出现空闲的现象,因此可以判断再让该作业人员多承担 1 台设备的管理任务的方案是不合理的(图 1.26)。

表 1.3 用于复合活动分析的标记

记号	名称	区分	表示作业人员活动时	表示机械活动时
	作业	运行	在固定场所从事某项工作	设备正在加工对象物
	准备	准运行	向其他设备移动(若与“准备”无区分的话可以将其归入“作业”)	设备停止作调整、整理(若与“准备”无区分的话可以将其归入“空闲”)
	玩	非运行	空闲中什么也不做,或者进行无意义的移动	设备停止或空转,不执行任何作业

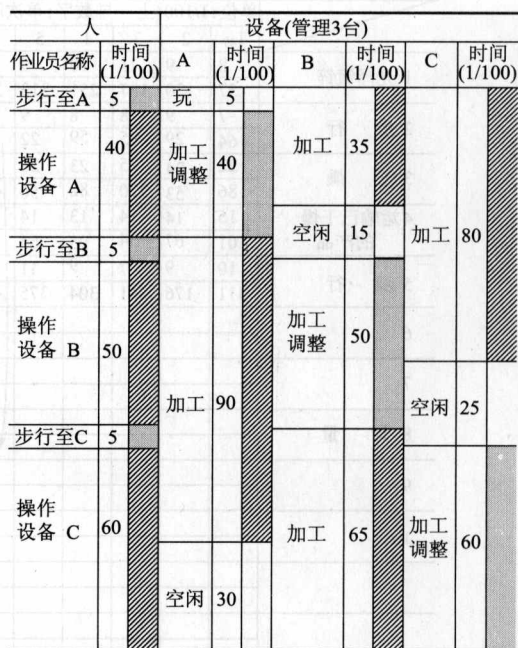


图 1.26 人和设备的分析图表实例

1.6.6 时间的研究

标准时间是工序设计和成本核算的基准,而制定标准时间的依据是从测量作业时间开始的。在开展时间研究之前,必须先制定作业方法的标准,完善作业环境本身。

1) 目的

时间研究的最重要目的就是制定标准时间,下面还可以列举一些其他目的:

- ① 作业方法的比较。
- ② 作业训练成果的评价。
- ③ 了解作业时间的分散性,实现稳定化。
- ④ 确定标准时间。

2) 方法

应该分成两类基本作业要素：一类是固定的作业要素，指产品和零件变更不会影响的作业时间值；另一类反过来是变化的作业要素。秒表是标准时间的典型工具，不过也有其他替代测量器具。选择测量对象时需要注意的是应该让操作员以稳定的速度从事稳定的作业。进行时间研究时，有时需要减去个别时间值，为了简化问题，有时就选用十进制钟表(1min被刻成100个刻度)来测量时间。

3) 案例分析

这里给出操作员从事连续循环作业的案例分析(表1.4)。M为观测误差，↓表示该时刻可以省略的某一个基本动作要素。另外，属于第Ⅰ类动作要素的“光泽镀锌”在进行第9次观测时出现的个别时间值25，把它用○围起来，表示该值与其他值的分散性太明显了，在计算平均值时不应该将其带入。这属于在质量管理的管理图或管理区域内出现异常结果的一种常用处理方法。

表 1.4 时间研究的实例

[示例] 作业内容: 光泽镀锌											操作员: ○○○○		日期: 5月25日		分析人员: △△△△	
	单位: 1/100(上一排数字: 单次时间值)(下一排数字: 读数)										合计 次数	平均	备注 (改进措施等)			
	1 ₄₉	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
1 光泽镀锌	8	9	11	10	9	12	10	11	23	8	88	9.7				
	57	120	187	251	313	387	481	550	629	684	9					
2 步 行	7	9	8	8	9	10	-	9	10	7	77	8.6				
	64	29	95	59	22	97	M	59	39	91	9					
3 干 燥	22	24	25	23	28	27	-	23	27	25	224	24.9				
	86	53	220	82	50	447	518	82	66	716	9					
4 运输已干燥 的产品	15	14	14	13	14	15	13	14	15	127	14.1					
	101	67	34	95	64	62	31	96	↓	31	9					
5 步 行	10	9	7	9	11	9	8	8	10	10	91	9.1				
	111	176	241	304	375	471	539	604	676	441	10					
6																
7																
8 计 量						23										
						420										
9																
10																
例外①																
②																
③																

吉本一穗

吉本一穗

参考文献

1.1 方法工程

- [1] 吉本一穗, 伊吕原隆: POM—生産と経営の管理一, 日本規格協会 (1999)
- [2] 吉本一穗, 大成尚, 渡辺健: メソッドエンジニアリング「経営システム工学ライブラリー9」, 朝倉書店 (2001)
- [3] 秋葉雅夫: インダストリアルエンジニアリング, 日

科技連 (1978)

- [4] 吉本一穗: 生産現場の設計・管理・改善, 東神堂 (2003)
- [5] 上野一郎: マネジメント思想の発展系譜, 日本能率協会 (1973)
- [6] 藤田彰久: 新版 IE の基礎, 建帛社 (1993)
- [7] 中井重行, 吉本一穗ほか: 工場計画, 共立出版 (1998)

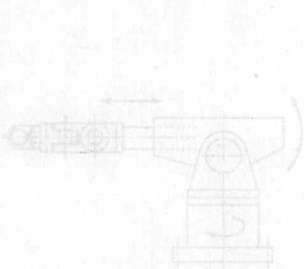
1.2 人机工程学

- [1] 坪内和夫：人間工学，日刊工業新聞社（1974）pp.1-20
- [2] 人間工学教育研究会編：人間工学入門，日刊工業新聞社（1987）pp.1-5
- [3] 伊藤謙治：高度成熟社会の人間工学，日科技連（1997）pp.1-8
- [4] 正田亘：増補新版人間工学，恒星社厚生閣（1997）pp.1-16
- [5] 齋藤むら子編：職場適応工学—人間主体の知覚・行動形成—，日本出版サービス（2000）pp.35-60
- [6] 芳賀繁：失敗のメカニズム—忘れ物から巨大事故まで—，日本出版サービス（2000）pp.99-136
- [7] 鈴木一重訳：人間工学—そのインパクト—，日本出版サービス（1999）pp.93-110

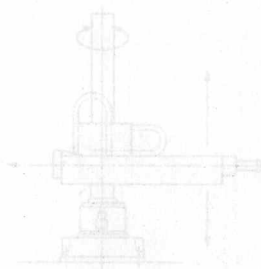
[8] Adaptive Environments Center: Universal Design, URL: <http://www.adaptenv.org/universal/> (2001)

1.4 设施的设计, 1.5 经济工程学, 1.6 面向技术人员的定量方法论

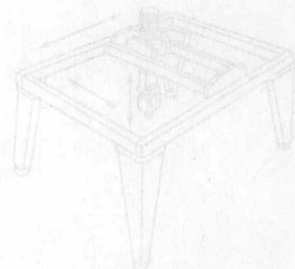
- [1] 吉本一穂，伊吕原隆：POM—生産と経営の管理—，日本規格協会（1999）
- [2] 吉本一穂，大成尚，渡辺健：メソッドエンジニアリング「経営システム工学ライブラリー9」，朝倉書店（2001）
- [3] 吉本一穂：施設計画の理論と実践，日本能率協会マネジメントセンター施設計画研究会（1997）
- [4] 吉本一穂：生産現場の設計・管理・改善，東神堂（2003）
- [5] 藤田彰久：新版IEの基礎，建帛社（1993）
- [6] 中井重行，吉本一穂ほか：工場計画，共立出版（1998）



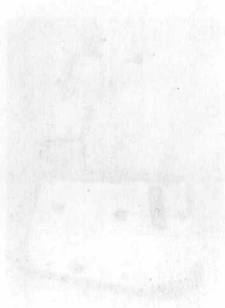
人機関係図(c)



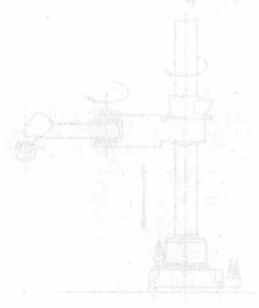
人機関係図(d)



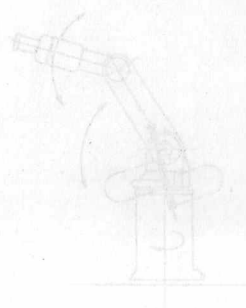
人機関係図(e)



人機関係図(a)



人機関係図(b)



人機関係図(f)

人機関係図(b)

第2章 机器人在制造业中的应用

2.1 工业机器人总论

2.1.1 工业机器人构成

在第1篇1.3节中介绍了工业机器人的定义:“一种能够通过自动控制来实现操作或移动,并且由程序对各种作业进行控制的工业用机械”(摘自《工业用机械手用语》(JIS B 0134-1998))。在同一个JIS规格中,还按机械结构的形式对工业机器人进行了分类,其基本形式如图2.1所示,此外还定义了“SCARA机器人”、“门形机器人”、“振子机器人”、“脊柱型机器人”、“并联机器人”等特殊形式的机器人。详细情况请参阅本书末尾附录中的JIS规格。

20世纪六七十年代,曾经一度流行圆柱坐标机器人和极坐标机器人。现在,由于缩小体积和扩大工作空间的要求,以及结构零件和控制技术的提高,大多已经改用关节型机器人了。历来由人工作业的上下料和搬运也实现了自动化,具有移动功能的机器人(图2.1(e))也实现了产品化。

2.1.2 工业机器人软件

工业机器人的程序包括控制程序和任务程序。控制程序是实现机器人系统功能的固定程序,操作人员通常是无法改变它的。任务程序是指“机器人系统实行作业时用来编制步骤、动作、条件的程序”(JIS B 0134),它

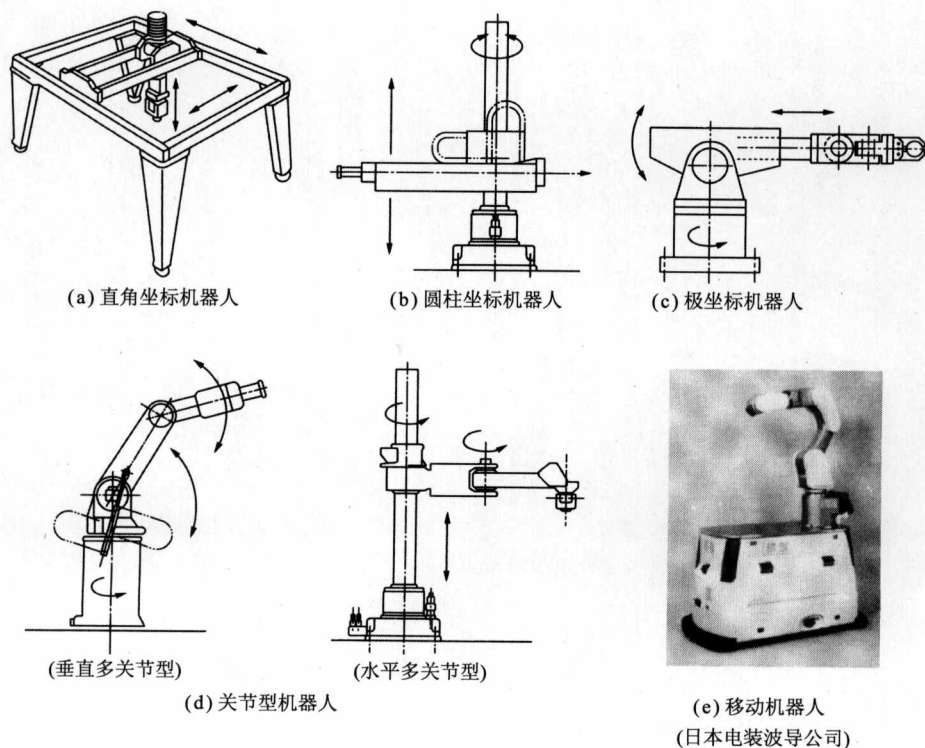


图2.1 工业机器人按机械结构形式的基本分类

注:除(e)外,均摘自JIS B 0134-1998。

是供机器人操作员使用的任务编制程序。

1. 任务程序编制

任务程序编制方法的分类如下。在早期,多数机器人都采用下面②中给出的示教再现的方式(teach by showing),不过现在已经发生了改变,在诸多方式中以输入位置信息的方式为最常用。

① 手动数据输入程序编制。即通过键盘等方式直接编程输入机器人的控制装置。

② 示教程序编制。根据 JIS B 0134 的定义,示教(teaching)是指“向机器人下达,并让它存储执行作业所必需的信息”。即通过手动机械手的末端执行器或模拟机器人机构,或者通过示教盒使机器人进行运动来完成程序编制的方法。

③ 动作指示程序编制。通过指示机器人动作路径和轨迹来完成程序编制的方法。

④ 作业指示程序编制。通过指示作业目的来完成作业程序编制的方法,它不同于动作指示程序编制的地方是它不需要直接指示机器人的动作路径和轨迹。

⑤ 离线程序编制。借助于与机器人分离的装置来完成程序编制,然后将编程信息输入机器人的方法。

2. 机器人语言

记录上述任务程序和控制程序的形式语言称为机器人语言。根据动作、对象、作业情况的不同它们可以分类如下。各种机器人通用的语言称为标准机器人语言,如 SLIM 已为大家所熟知。

① 动作级语言。动作级语言是对应于机器人基本动作级别的编程语言,在工业机器人中它应用得最多。

② 对象级语言。对象级语言是对应于对象物之间操作级别的编程语言,它属于高级机器人语言之一,但是目前尚未进入实用。

③ 作业级语言。作业级语言是对应于某一类作业级别的编程语言。

长谷川健介

2.2 通用机械手总论

2.2.1 工业机器人的使用状况

JIS B 0134-1998 给工业机器人的定义是

“一种能够通过自动控制来实现操作或移动,并且由程序对各种作业进行控制的工业用机械”。据报道,日本在 1967 年前后从美国输入了示教再现机器人,其后日本开始了工业机器人开发和应用的进程。经过多年的研究、开发和普及,据 IFR(International Federation of Robotics,国际机器人联合会)2002 年的调查显示,世界正在运行的工业机器人中大约有一半在日本(表 2.1)。

表 2.1 世界在役工业机器人的数量

国家或地区	数量/台
日本	350 169
韩国	44 265
新加坡	5 346
澳大利亚	3 310
中国台湾	7 491
美国	103 515
比利时、荷兰、卢森堡	8 674
丹麦	1 853
芬兰	3 023
法国	24 277
德国	105 217
意大利	46 881
挪威	664
瑞典	6 846
瑞士	3 504
英国	13 651
西班牙	18 352
葡萄牙	844
奥地利	3 521
匈牙利	176
波兰	644
俄罗斯	5 000
捷克	1 025
其他	11 640
合计	769 888

注:不包括手动机械手和固定顺序机械手。

摘自:IFR2002 年末统计。

据日本机器人工业会的统计资料,表 2.2 和表 2.3 分别给出机器人按行业类别和用途的实际销售额。表 2.4 给出机器人的主要用途(作业)。随着新材料、新技术的诞生,机器人的用途还会不断地向新的应用领域拓展。

表 2.2 机械手和机器人按行业类别
的实际销售额(2002 年 1~12 月)

应用领域		销售额/百万日元
钢铁		517
非金属		275
金属制品		5 462
机械器具	锅炉、原动机	169
	土木建筑机械	515
	金属加工机械	1 921
	其他一般机械	25 306
电子机械	电子计算机	1 245
	家用电器	5 504
	电子机械	14 060
	无线电、TV、通信装置	16 378
其他电子机械		17 673
精密·光学设备		1 846
交通	船舶制造修理业	95
	铁路、车辆	221
	汽车	30 053
	汽车零配件	33 938
	飞机	4
	摩托车	25
	自行车	302
	工业车辆	114
	其他运输机械	154
食品、饮料、烟草		6 358
布料、衣服;皮革制品		20
木材、木制品、软木制品		140
纸、纸制品、印刷、出版业		1 610
化学品、化学制品		1 575
石油制品、煤炭制品		50
橡胶制品		92
塑料制品		14 215
陶瓷、土石制品		1 304
其他行业		15 329
制造业小计		196 467
农业、林业、渔业		360
电力、煤气、自来水		1 059
建筑业		86
运输、仓储、通信业		128
研究开发业		91
教育		248
其他非制造业		1 819

续表 2.2

应用领域	销售额/百万日元
非制造业小计	3 791
国内销售	200 258
出口	183 590
销售合计	383 496

摘自:日本机器人工业会的统计资料。

表 2.3 机械手和机器人按用途类别
的销售情况(2002 年 1~12 月)

用途		销售额/百万日元
压模铸造		1 988
其他铸造		110
锻造		34
树脂成型		24 638
冲压成型		4 337
焊接	弧焊	30 168
	点焊	44 681
	激光焊接	231
	其他焊接	258
喷涂		8 783
机械加工	装料、卸料	15 788
	机械切断	38
	研磨、去毛刺	1 132
	其他机械加工	3 072
切割	气割	27
	机械切割	156
	水力切割	237
	其他切割	966
装配	普通装配	22 786
	插装	3 094
	表面贴装	109 664
	键合	25 385
	锡焊	231
	密封、胶合	1 543
	螺栓紧固	515
	其他装配	675
出入库		9 813
测量、检测、实验		9 149
材料管理		18 530
教学和研究		836
洁净间作业		32 721
其他		12 263
合计		383 848

摘自:日本机器人工业会的统计资料。

表 2.4 工业机器人的用途和技术概述^[2]

用途(作业)	概 述
铸造、压模铸造	<p>铸造是将熔融金属(熔液)浇入铸型中,并使其凝固的制造方法。铸型多为砂型。压铸(die casting)则是以高压将铝、锌合金为主的金属熔液注入金属模的一种铸造方法,该方法经常用于薄壁构件的大量生产</p> <p>机器人作业的任务是向金属模腔内插入型芯、从型腔内取出成品、模腔内面的喷涂(脱模剂涂布)等</p>
锻造	<p>锻造是通过工具向金属材料加压使之产生变形以获得锻造效果的加工方法。按温度的高低可以将其分为热锻、温锻和冷锻,按成型方式将其分为自由锻(在空气锤或液压机锤头与铁砧之间压缩成型)和模锻(在按形状要求制成的一组金属模内成型)两种</p> <p>机器人的任务是为模锻机、修边机等上料、取料,取出飞边等</p>
树脂成型	<p>分为注射模塑成型(将树脂注入模型内使零件成型)、嵌件成型(在金属模内装入嵌件,如金属块、导线、电子元件等,然后注入树脂形成复合零件)。机器人用于成品取出,或者在前端安装空气剪以便切断树脂成型品的浇口、插入嵌件等</p> <p>此外,还有吹塑成型(向合成树脂板吹热风,有时可以在背面配合抽吸,使树脂板与模具内腔贴合),此时机器人担负物料搬运、热风机操作等任务</p> <p>FRP(Fiber Reinforced Plastics, 纤维增强塑料)的制作也可以让机器人完成绕线成型(在辊轴模型上,一边向长条波瓣状增强材料浸渍树脂,一边缠绕硬化的制造方法)时的纤维引导作业</p>
金属冲压	<p>冲压机是在两个以上配对的金属模之间放置被加工材料成型的一种设备</p> <p>机器人可以用于被加工材料(工件)的上、下料,它往往被设计成专用设备</p>
弧焊	<p>弧焊是利用低电压、大电流的电弧放电现象在局部产生大量热量使金属接合的方法</p> <p>焊接机器人以焊枪为末端执行器,它的应用非常广泛。如果两台以上的机器人进行协调操作,抓取工件的一方机器人可以实现位置补偿</p>
点焊	<p>点焊是利用电极向被焊接材料加压,让短时大电流通过电阻发热进行接合的一种电阻焊的方法。与电弧焊相比,它的特点是不需要焊剂</p> <p>点焊机器人的应用形式是以焊钳作为末端执行器。有的点焊机器人具有焊钳交换功能(机械接口),可以通过更换焊钳实现打点功能</p>
激光焊接	<p>该方法利用激光的高能量密度热源,使钢材、非钢铁材料、塑料等局部熔化完成焊接。YAG(Yttrium Aluminium Garnet, 钇铝石榴石)激光可以沿柔性的光纤进行传输,所以激光照射部分可以充当机器人的末端执行器,按照给定的速度和位置,借助于非接触方式在工件上进行焊接</p>
其他焊接	如利用摩擦接合的焊接方法
喷涂	以喷枪为机器人的末端执行器完成工件的喷涂任务
上、下料作业	机器人用于机床的毛坯的运输、供应,工件的装卸作业
机械切断	利用刀具等机械切断装置完成工件切断作业。通常在机器人的末端执行器部位安装刀具
研磨、去毛刺	<p>除去零件成型时产生的毛刺、熔渣,以及进行抛光打磨等,机器人在这方面的应用很广泛</p> <p>有不同的作业方式。如机器人末端执行器安装研磨装置后接近工件,或者机器人抓取工件接近研磨装置等。机器人工具的形式也很多,如圆刷工具、旋转切割砂轮、电动除锈器、低压研磨机等</p>
其他机械加工	例如,采用高刚性机器人抓取工件,以此定位于平面铣刀或端铣刀处实现平面加工。此种加工方式还存在定位精度和刚性不足等问题,因而鲜有应用
气割	利用燃烧热能使材料局部熔化并将其去除的切断方法,该方法在钢材热切断方面有广泛的应用。大多数场合在机器人的末端执行器部位安装割炬
激光切割	<p>该方法利用激光的高能量密度集中热源使钢材、非钢铁材料、塑料等局部熔化进行切割。YAG(Yttrium Aluminium Garnet)激光可以通过柔性光纤进行传输,所以激光照射部分可以充当机器人的末端执行器,按给定的速度和位置,借助于非接触方式在工件上进行切割</p>
水力切割	<p>该方法从极细的喷嘴中喷射高压水(通常在水中掺入磨粒),利用动能来切断工件。该方法对非耐热材料实施切断极为有效。由于水的压力高流量小,其切断过程几乎不产生反作用力。其作业形式是在机器人末端执行器部位安装高压水喷嘴,以给定的速度沿工件的给定位置进行移动完成切断</p>

续表 2.4

用途(作业)	概 述
其他切割	例如,等离子切割
一般装配	利用高精度和高刚性机器人完成装配、紧固等作业。作业对象一般限于人的两手活动范围大小的各种设备、装置、结构件、零件等
插装	该工序将 DIP IC、接线端子、电容等电子元器件插入印制电路板。此类作业既可以采用通用机械手,也可以采用专用电子元件装配机器人
表面贴装	用于将芯片贴装到印制电路板上的工序。机器人的工作条件与插装类似
键合	键合分为两种应用场合:一种叫做芯片键合,是将 IC 硅芯片贴装到引脚框(半导体元器件突出的引脚部分)上;另一种叫做引线键合,是利用 20~50 μm 的金丝(或铝丝)将芯片电极与引线框的电极连接起来。它们多为类似机器人的专用设备,今后会更多地采用微型机器人
钎焊	完成印制电路板上元器件和导线的焊接
密封、胶合	密封以防水、防尘为目的,胶合以结合为目的 密封作业可以在机器人的末端执行器部位安装封口枪,靠压力将密封材料按数量要求送到指定位置完成涂布工序。胶合作业则在机器人末端执行器部位安装敷料喷嘴,在料罐压力下黏合胶被压送至给定位置,按给定的数量将其涂布在工件上
螺栓紧固	螺栓紧固机器人利用真空吸附或磁力吸附抓握螺栓,按给定的压力和转矩紧固螺栓。螺栓紧固机器人也常用于螺栓检查作业
其他装配	在装配作业中,机器人完成各种零件的拾放等任务
出入库	将装满产品的方箱或托盘码垛、拆垛,或者把产品码放在托盘上
测量、检查、试验	机器人可用于产品完工后的检查或出库检查,避免次品出入库,为保证产品出库质量进行必要的测量、检查、试验。检查包括外观检查(零件产品的表面缺陷、异物混入、形状不良等外观或缺陷检查)和特性检查(排除电气、机械无法正确动作造成的废品) 检查有两种形式:一种是在机器人末端执行器部位安装探测传感器进行检查;另一种是机器人将单个零件运送到检查设备附近接受检查
材料搬运	搬运工件,在不同工序之间实现转送
教学和研究	用于学校的教育、公司的内部教育,以及引进实际机器人之前的仿真测试等
洁净间作业	用于洁净间内的工件搬运或测量等作业
FPD 用	液晶平板运送等作业需要洁净间机器人
半导体用	晶片运送作业需要洁净间机器人
其他	硬盘组装用等
其他	扫除、警卫、娱乐等,以及其他用途的机器人

摘自:日本机器人工业会的统计资料。

表 2.5 机械手、机器人的产量(2002 年)^[2]

分 类	产量/台
机械手	(4 712)
手动机械手	235
固定顺序机械手	4 477
机械手	(48 602)
直角坐标型机器人	8 912
圆柱坐标型机器人	1 949
极坐标型机器人	132
垂直多关节型机器人	31 547
水平多关节型机器人	5 143
并联机器人	30
其他机器人	889

摘自:日本机器人工业会的统计资料。

2.2.2 工业机器人技术

1. 构 造

由第 3 篇中“2.1 手臂的机构”可知,工业机器人按结构形式可以分为直角坐标型、圆柱坐标型、极坐标型、关节型、水平关节型、并联机构型等。由 2002 年的产量统计可知,垂直多关节型机器人占日本国内生产总数的一半以上,其次是直角坐标型机器人、水平多关节型机器人(表 2.5)。多关节型机器人的优点是能够灵活地躲开机座与末端执行器之间的障碍物,随着计算机性能的提高和软件的完备,多关节型机器人的通用性将进一步得

到提高,因而其普及速度还将会加速。

评价机器人的基本性能指标如下:

- ① 速度。
- ② 精度(重复位置精度)。
- ③ 工作空间。
- ④ 输出(负载重量)。

上述四项指标中以哪一项为优先将直接关系到机械手的设计。关节的支撑方法(悬臂梁支撑、简支梁支撑)与手臂的运动范围和刚性有关。设计的基本手段是减轻手臂的质量,采用大功率小型电机和高效率减速器,第3篇2.1节侧重从结构的角度对机器人进行分类。事实上,现在有不同用途和各种输出功率的机器人,可供用户选择自己最满意的型号以满足其作业要求。此外,安装方式(地面式、悬挂式、壁挂式)、占地面积、环境适应性(防尘、防漏)、对环境的影响(洁净间机器人等)等也都是选择机器人时要考虑的条件。

产业领域应用在结构方面对机械手呈现出形形色色的要求,如移动机器人,它是将机械手搭载在自动移动的载体上构成的;还有“双臂机器人”,它是在垂直多关节机器人的末端装上两条水平多关节机器人构成的;另外一类机器人的刚性极高,以便满足向机械加工普及的需要。

为了维护方便,机械手驱动器大多采用交流伺服电机。为了防止急停或停电时机器人手臂松脱,应该根据需要在驱动器上安装制动器。

2. 控制技术

随着控制器的小型化和性能的改善(高速、高精度、网络化、图像接口功能等),以及将PC机技术向机器人控制器移植之后大大提升了硬件周边技术的结果,迄今为止人们研发的各种控制方法的成果得到广泛的应用,使力控制、图像处理、协调运动等步入实用化。

FA系统的网络技术包括CC-Link(Control and Communication Link,控制与通信链路系统)、PROFIBUS(国际标准IEC 661158)等,这表示生产系统的控制与通信是不可分割的。

随着传感器技术的进步,出现了高分辨率的绝对码盘,它用来充当机械手关节的角

度传感器。绝对码盘不必再像增量式码盘那样在启动时必须进行初始复位,因而提高了生产率。

下面给出了在各种机械手中已经被应用的控制技术。

[已经实现的功能举例]

- ① 多机器人协调动作(通信)。
- ② 力限制功能(调整压力,以免施加于工件的力过大,也能实现所谓的外力跟踪——“仿形”)。
- ③ 插入力控制功能(通过限制电机的电流将驱动力控制在设定值,省去弹簧和传感器,降低了设备成本)。
- ④ 碰撞检测(示教时的误操作保护)。
- ⑤ 负载推测。
- ⑥ 诊断信息显示(供机器人维修和诊断用的各种信息)。
- ⑦ 设备综合控制(利用机器人控制器控制其他设备)。
- ⑧ 图像伺服。
- ⑨ 压入力伺服。
- ⑩ 最优加减速控制。
- ⑪ 最优负载重量的设定功能(根据输入负载重量能够对动作速度作出适合的设定。能够随工件装卸的不同质量状态而变化,设定最优动作速度)。

⑫ 动作区域的设定功能(避免动作与设备发生干涉)。

⑬ 自动调整(利用PC机或示教盒可以在短时间内按照负载设定加速度、伺服增益,改善调整前可能产生的噪声和振动)。

3. 系统化技术

在生产工序中,大多采取把机械手固定到作业机上对工件进行操作的形式。至于机器人,它在工序中所承担的作业是各种各样的,如机器人抓取工件将它移转至某个固定的作业机上(如进行研磨等),或者固定工件的胎具是运动的,它配合机器人的动作,或者让多台机器人协调动作等。

2.2.3 机器人的有关规格

产业界在引入机器人时,各个制造商提供的性能指标不同,编程语言也不同,给用户带来了很大的负担。因此,有关部门制定了

关于机器人的 JIS 规格,经反复修订后得到现有的规格描述方法,其详细内容可以参阅本书结尾的附录——机器人相关 JIS 规格一览表。下面仅介绍一些基本性能。

1. 坐标系

工业机器人采用的坐标系如表 2.6 所示,是按照《工业机械手坐标系及其运动符号》(JIS B 8437-1999)定义的。

表 2.6 坐标系

坐标系	定义
世界坐标系	它设置在地面或作业基础面上,是以用户给定的场地内的某一个点为原点而建立的。其法则为以 X_0 - Y_0 面为水平面, $+Z_0$ 轴方向沿重力作用的反方向(向上)
基础坐标系	设置在机器人安装基础面上的坐标系,与机器人固接在一起,以机器人的底面为基准面,机器人安装完毕后该坐标系就给定。基础坐标系的 $+Z_1$ 轴方向为自基准面指向机器人本体的方向。 $+X_1$ 轴方向为机器人处于中间状态时,机械接口的中心在基准面上的投影方向。如果机器人设置在水平面内,那么 $+X_1$ 轴在正面, $+Y_1$ 轴朝向机器人的右方
机械接口坐标系	设置在机械接口处的坐标系,其基准面为机械接口面,原点为其中心。 $+Z_m$ 轴为自机械接口指向末端执行器的方向, $+X_m$ 轴由位于作业区域中心的平面坐标系处于工作空间中中央时机械接口面与基础坐标系的 X_1 - Z_1 面的交线确定,远离 Z_1 轴的方向为正

• 采用右手直角坐标系。

• 世界坐标系也可以取在场地中具有某个原点的设备、装置为基准。

2. 定位精度

定位精度包括绝对定位精度和重复定位精度,如表 2.7 所示。

表 2.7 定位精度

分类	方法
绝对定位精度 (accuracy)	代表指定位置与实际位置的偏差,用反复多次测试的定位结果的代表点与指定位置之间的距离来表示
重复定位精度 (repeatability)	同一个位置命令重复多次执行定位动作,以实际位置值的分散程度来表示。实际上,以重复测试结果的标准偏差值的 3 倍表示(制造商的产品样本上登载该数据)

3. 末端执行器

机器人在进行实际作业时,需要末端执行器,它除了具有抓取机构外,还有一些具有特殊功能的末端执行器。例如,真空吸附装置、电磁吸附装置、喷涂的喷枪、焊枪等都属于具有特殊功能的末端执行器。

JIS B 8436、8441 规定了机械输入接口的标准。

市川 诚

2.3 AGV

2.3.1 FA 工厂自动化

AGV 是 Automated Guided Vehicle 或 Automatic Guided Vehicle 的简称,称为无人搬运车。

目前,在生产和物流领域,为了满足多品种小批量、变品种和变产量生产的要求,对生产的自动化和省人化的期望很高。

众所周知,在生产的各个工序之间适时运送零件,对于提高生产效率有重要作用。

除 AGV 之外,其他的运输装置还有传送带、轨道车等,不过对生产品种的柔性来说,AGV 往往最适合。

2.3.2 AGV 的种类

很早以前工业界就开始使用 AGV 了,根据用途的不同,它有各种形式。

通常,无人搬运车有如下几种。

1. 无人搬运车

所谓无人搬运车就是通过人工码放或自动码放将工件堆放在台车上之后,小车能够进行自动行走,将工件自动运送至指定位置,然后再通过人工或自动进行卸载。其特征是小车自身具有将载荷移放到台车上的能力,然后进行搬运操作。图 2.2 所示为无人搬运车的外形。

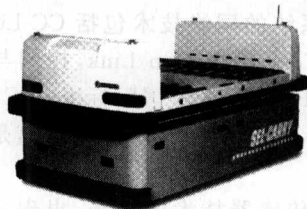


图 2.2 无人搬运车(神钢电机)

2. 无人牵引车

所谓无人牵引车(automatic guided tractor)就是能够牵引堆载货物的台车,自动到达指定位置,然后通过人工或自动卸载的车辆。也称其为无人 tractor trailer。图 2.3 所示为无人牵引车的外形。

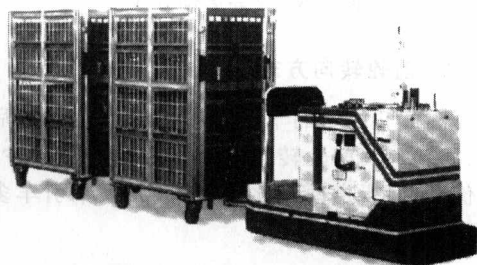


图 2.3 无人牵引车(神钢电机)

3. 无人叉车

所谓无人叉车(automatic guided forklift truck)就是装载货物的车叉能够上升、下降,车叉自动装载货物,然后自动行走到达指定位置完成自动搬运装载作业的叉车。图 2.4 所示为无人叉车的外形(单侧叉式)。

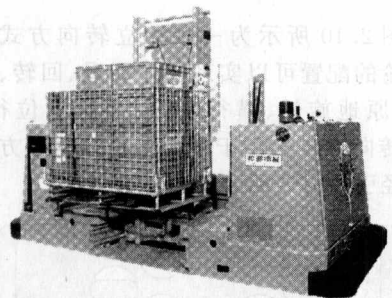


图 2.4 无人单侧叉车(神钢电机)

2.3.3 引导方式

AGV 具有代表性的引导方式有以下三种。

1. 固定路径引导方式

固定路径引导方式,即利用连续信息设定路径的引导方式,主要有电磁式、光学式和磁性式。

1) 电磁式

电磁式引导是在行走路线上埋设电缆,利用电缆中通过的低频电流产生磁场,在车体底部设置一对耦合线圈来检测磁场,以两

者的输入达到一致为目标实现驾驶。该方式在地面施工方面花费的成本较高,但是这样的引导方式承受地面变色和污染的能力较强,适用于重物运送和室外无人运送的应用场合。图 2.5 所示为电磁式引导的示意图。

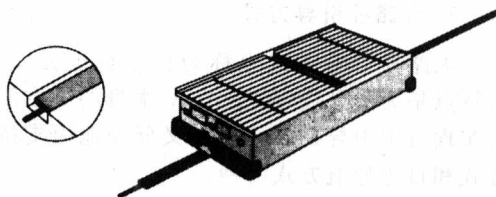


图 2.5 电磁式引导的示意图

2) 光学式

光学式引导通常在行走路线上安装反射条(铝带、不锈钢带等),AGV 的车体发射光线经地面反射条反射回来,根据对这些信息的感知沿反射带进行驾驶。这种方式需要在地面敷设反射条,施工简单且容易变更,因此其适用于轻巧物体的运送和频繁变更的应用场合。然而,地面的色彩和反射条的污染会引起一些噪声,因此需要经常对反射条进行维护。

3) 磁性式

磁性式引导通常在地面敷设铁酸盐橡胶磁条,在车体底部设置磁性传感器进行检测,使车体沿着磁条驾驶。与光学式相比,该方式承受地面变色和污染的能力稍差,而且磁条既厚质地又柔软,因此需要对其加以防护。图 2.6 所示为磁条粘贴和埋设的示意图。

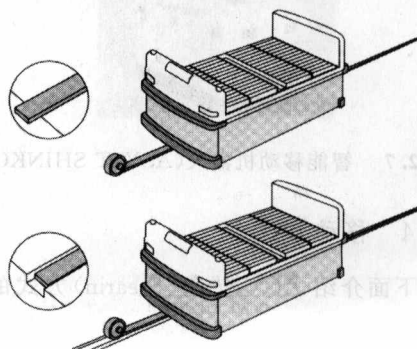


图 2.6 磁条引导的设置示意图

2. 半固定路径引导方式

半固定路径引导方式,即在地面上间断设置路标(光学、磁铁)或条形码等,利用搭载

在车上的传感器(ITV 摄像头、磁性传感器等),边辨识标记的位置边行走的方式。

该方式在路径设定方面比较简单,更改路标设置也比固定路径引导方式简单,但是路标间距的大小是一个值得探讨的课题。

3. 无路径引导方式

无路径引导方式也称为自主行走方式,其特点是无引导线,通过 AGV 本身的自主能力实现行走引导的方式。它又分为地面支持方式和自主导航方式两种。

① 地上支援方式。该方式在 AGV 的行走空间内设置激光标杆、超声波标杆、直角棱镜等,然后根据这些标记的位置关系计算 AGV 自身的位置完成行走引导。

② 自主导航方式。该方式通常在 AGV 内部备有地图和编码器,同时用陀螺仪、超声波传感器和摄像头构成图像处理系统来识别外部环境,确认 AGV 自身的位置,实现行走引导。该方式很适合柔性系统,但是其造价高、结构复杂,所以在一般的 AGV 中用得较少,它更多地应用于智能移动机器人。图 2.7 所示为智能移动机器人的例子。

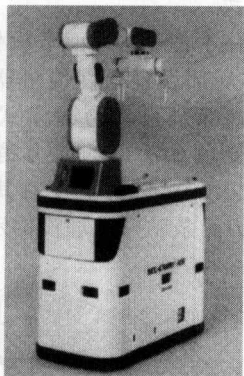


图 2.7 智能移动机器人(ASYST SHINKO)

2.3.4 移动方式

下面介绍 AGV 转向(Stearin)方式的特点。

1. 2 轮差动方式

图 2.8 所示的车辆配置可以实现前进后退、回转、自旋回转、原地旋转等。2 轮差动方式是 AGV 行走方式中采用最多的方式。

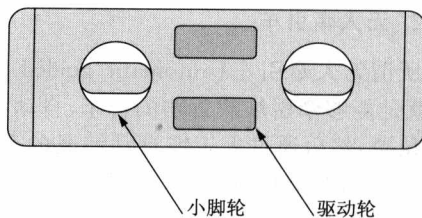


图 2.8 2 轮差动方式

2. 前轮转向方式

图 2.9 所示的车轮配置可以实现前进后退、回转。其前轮转向方式需要的电机数少,造价低,但行走模式比较简单,无人牵引车多采用该方式。

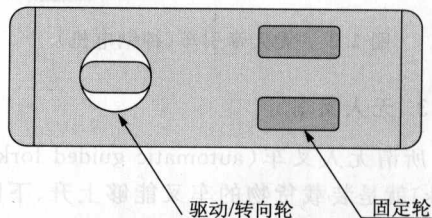


图 2.9 前轮转向方式

3. 独立转向方式

图 2.10 所示为一种独立转向方式。根据车轮的配置可以实现前进后退、回转、自旋回转、原地旋转、横行、斜行等全方位行走。这种转向方式多用于半固定路径引导方式和无路径引导方式的 AGV。

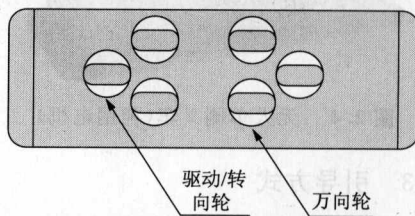


图 2.10 独立转向方式

2.3.5 装卸方式

AGV 行走至指定位置(站点)后即可自动卸载工件,站点的形式和工件的形状不同,所采用的卸载装置的形式也不同。图 2.11 给出几种典型的 AGV 卸载方式,现介绍如下:

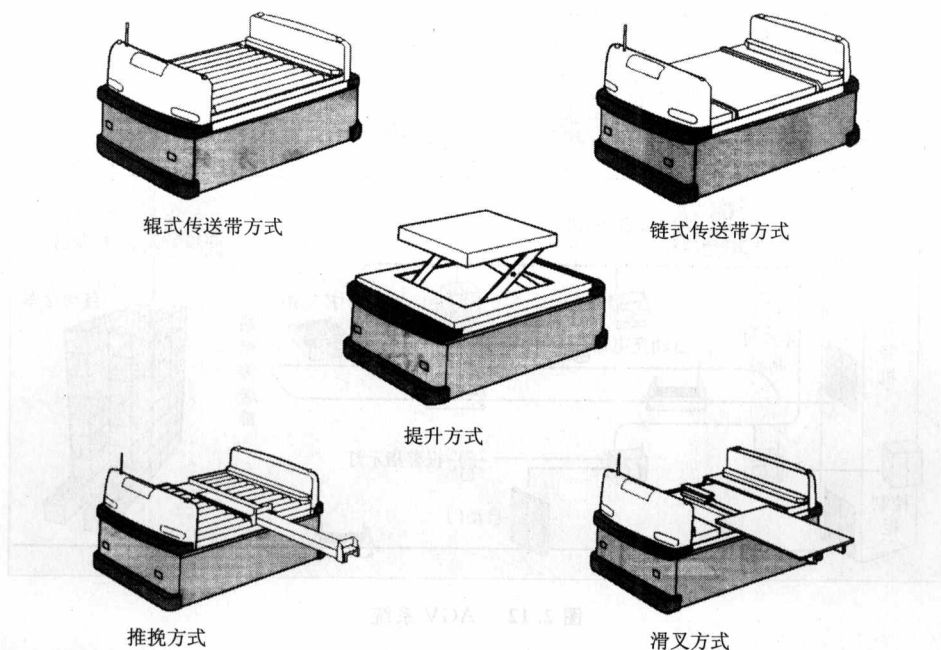


图 2.11 AGV 的卸载方式

1. 辊式传送带方式

在 AGV 的料台上安装有辊式传送带, AGV 和站点之间的两台传送带彼此同步驱动即可实现工件的水平卸载。

2. 链式传送带方式

在 AGV 的料台上安装有链条驱动的传送带, AGV 和站点之间的两台传送带彼此同步驱动即可实现工件的水平卸载。

3. 提升方式

通过液压驱动方式的升降装置即可实现卸载。

4. 推挽方式

AGV 一侧和站点一侧同时支撑工件, 利用推挽装置上的爪钩实现水平卸载。

5. 滑叉方式

在 AGV 的左、右两侧设置滑叉, 叉柄支撑工件的质量同时进行水平移动即可实现卸载。

2.3.6 搬运系统

图 2.12 给出 AGV 系统的一个例子。

AGV 搬运系统由 AGV 控制器 (AGVC)、本地控制器 (LC)、自动充电器、站点控制柜和

AGV 等构成。

AGVC 有两种连接方式: 一种与负责搬运系统全局管理的运送管理控制器连接; 另一种直接与客户端控制器连接。

AGVC 通过上位机及其交互界面实施 AGV 系统的全面管理。LC 则通过通信电缆与 AGVC 进行连接, 实现对自动充电器、自动门等周边设备的控制。由于 AGV 的运行范围很广, 因此 AGVC 经由 LC 实现与 AGV 的通信。

当 AGVC 从上位机接收到运送命令 (从站点 A 运送到站点 B) 后, 向处于待机状态的 AGV 发出行走至站点 A 的命令。接到命令的 AGV 沿路径运行到站点 A。当它到达站点 A 后, AGVC 将控制站点控制柜完成向 AGV 码放工件的作业, 然后 AGVC 向 AGV 发出让其向站点 B 行走的命令。最后, AGV 运动到站点 B 并将工件卸载。

在一连串的命令集中有时可能还包含楼层之间的搬运任务, 此时需要搭乘升降机实现楼层之间的移动。通过与升降机控制柜之间的通信可以实现这个作业。

绝大部分的 AGV 的能量取自电池, 因此还必须对电池容量进行监测, 如果发现电池容量不足, AGV 可以在 AGVC 的命令下运行到充电处自动充电。

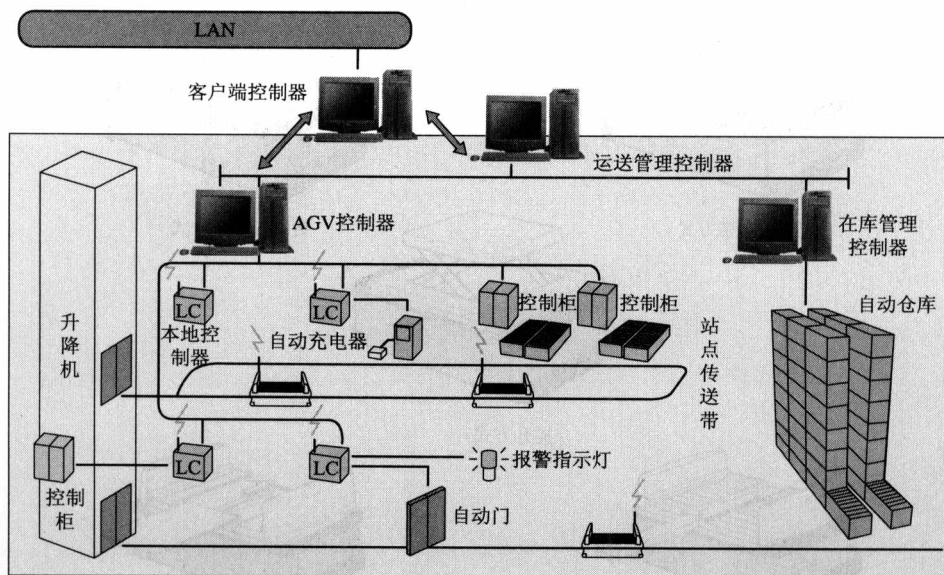


图 2.12 AGV 系统

2.3.7 应用系统

现在,AGV 系统已经是生产车间或物流领域不可缺少的搬运系统了。它运送工件的质量跨度范围相当大,从数十吨的笨重物件到数千克的轻巧物品不等,运送的货物有钢材、产品模块、电子元器件等。

尤其在半导体或液晶车间,AGV 广泛用于晶片、液晶平板等的搬运。

图 2.13 是一种料台隐藏在底盘内的 AGV,宾馆、旅店、医院的膳食配送系统经常用到这一类形式。

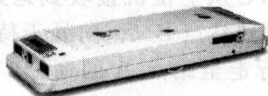


图 2.13 AGV(神钢电机)

可以期待的是,今后 AGV 系统不仅会用于工厂和物流领域,而且必将拓展到各种自动运输系统。

参考文献

2.1 工业机器人总论

- [1] 産業用マニピュレーティングロボット—用語 JIS B 0134 (1998)
- [2] 新井民夫編著:産業用ロボット言語“SLIM”,日本規格協会 (1994)

2.2 通用机械手总论

- [1] ロボットメーカー各社カタログ
- [2] 日本ロボット工業会編:ロボットハンドブック (2001)

2.3 AGV

- [1] 中央労働災害防止協会編:無人搬送車の安全,中央労働災害防止協会 (1990)

第3章 各种作业与机器人

3.1 物料搬运

3.1.1 铸造

由于铝材压铸(aluminium diecast)件表面光滑精度高,不大需要后续的加工工序,因而其广泛应用于各个工业生产领域。

熔融金属的处理是一项危险作业,不但室内温度高,而且充斥着脱模剂的气味,环境十分恶劣,是用机器人代替人工作业极有希望的领域。

图 3.1 是一个压铸自动化系统的示意图。下面我们从位于中央的熔化炉(furnace)开始,经过位于左右两侧的两台压铸机直至后加工工序依次进行说明。

1. 材料供给

图 3.2 所示为铸造时的铝锭投放场景图。当熔化炉内的液面低于某一个设定的高度值后就应该向炉内投入铝锭。若投料间隔过短,则熔液温度会过低,因此必须根据熔化炉的熔化能力来确定原料投放时间的间隔。

在作业中,由于铝锭放置的位置并不确定,需要用传感器来检测铝锭的位置。

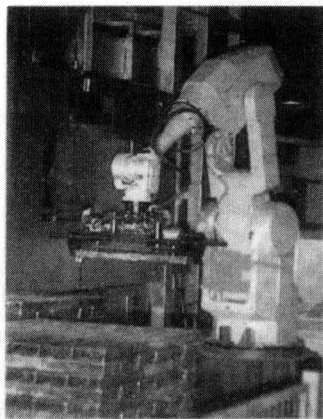


图 3.2 铝锭投入

2. 浇注

图 3.3 所示为浇注机器人。机器人浇注的作用在于能提高浇注计量的精度,不会泼洒铝液,并且能实现平稳的浇注过程。从报道的应用实例来看,为了防止机器人受热后其性能下降,铸勺(ladle)应该足够长,使机器人远离热源。倾倒铸勺时需要靠一根附加轴(auxiliary axis)进行控制,而且应该控制机器人的姿态恰好对准浇注口。

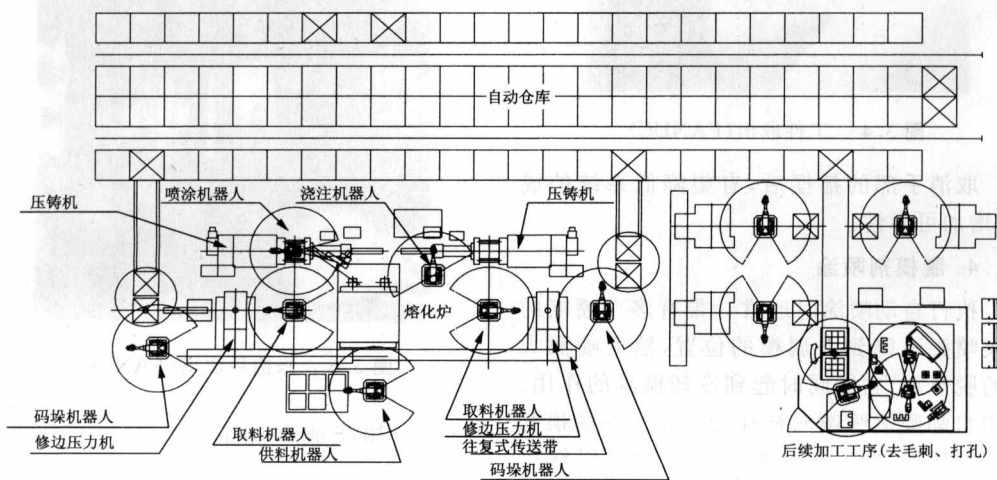


图 3.1 压铸自动化

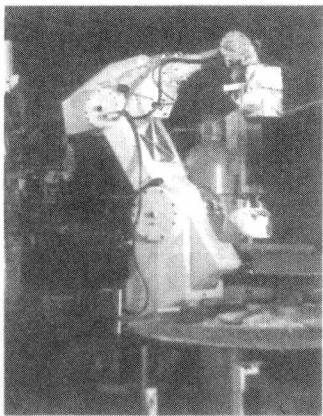


图 3.3 浇注机器人(FANUC)

3. 取出

成型结束后金属模会打开,工件由压铸机的出料器(ejector)推出。为了让取料机器人能取出工件,有必要模仿出料器的动作,通常的方法是让机器人手部增加一个摇摆动作配合出料。其缺点是这样一来手部的定位可能会不够稳定,并造成了结构复杂化。近年来,机器人伺服技术有了长足的进步,因此有可能在特定方向上将机器人的伺服刚性弱化来模仿出料器的动作(图 3.4)。

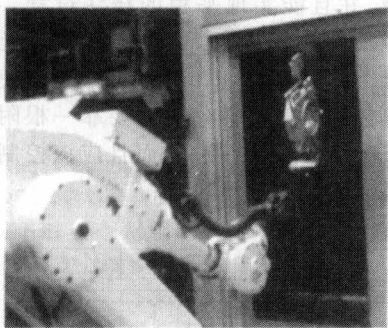


图 3.4 工件取出(FANUC)

取消手部的摇摆后,有望降低系统的成本,增加可靠性。

4. 脱模剂喷涂

执行自动喷涂时通常让带有多个喷嘴的集束喷头下降到金属模的位置,然后喷洒大量的脱模剂,它能同时起到冷却模具的作用。使用自动喷洒喷嘴时往往会存在一些脱模剂很难到达的死角,加大喷洒量虽然可以解决一些问题,却又会造成模具被过度冷却的问题,不利于稳定成型。

图 3.5 给出喷涂脱模剂的场景。喷涂机器人带动集束喷头运动进行喷洒,机器人做极细微的动作,能在短时间内向金属模上必要的地方喷涂适量的脱模剂,起到稳定作业质量,缩短生产周期的作用。

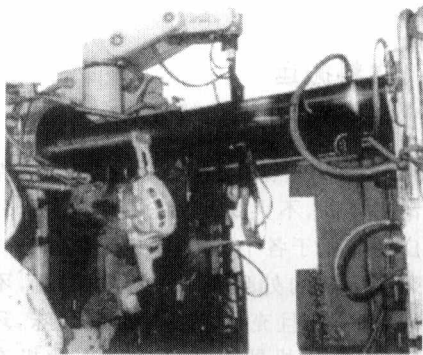


图 3.5 脱模剂喷涂(FANUC)

5. 修边(trimming)

从压铸机中取出的工件,要用修边机切除多余部分,如铸口、冒口等。

从修边机中取出的过程类似于压铸机,同样需要由出料器将工件推出,也需要模仿推出动作,目前仍然处于从手部摇摆机构动作模仿向机器人伺服模仿过渡的状态。

与冷修边处理相比,热修边(hot-trimming)处理能降低工件的内应力。如果改用卧式修边机,那么切下来的铸口和冒口就能自然地掉落下来,以避免切屑飞溅。

图 3.6 为从修边机中取料的场景。

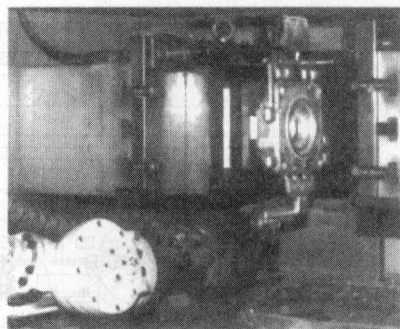


图 3.6 修边后取出(FANUC)

3.1.2 树脂成型加工

树脂成型加工的特点是一旦开始成型,一般就要进行长时间的连续作业,可见引入

机器人有利于改善作业条件,减少劳动时间,降低工件的成本。驱动,后者正呈现逐年增加的趋势。

用于取出成品的机器人机构大致可以分为三类:摇臂式(swing arm type)、直角坐标式(cartesian type)、多关节式(articulated type)。过去多采用气压驱动(air driven)方式,从20世纪90年代后期开始伺服驱动(servo driven)方式迅速增加。

图3.7示出了各种方式所占的比例。

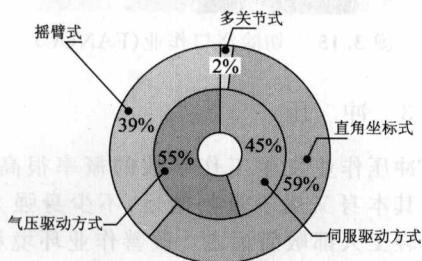


图 3.7 各种成品取出机器人所占的比重(2000年)

1. 摇臂式

摇臂式取出机器人(图3.8)的优点是结构紧凑,造价低廉,缺点是工作空间有限,而且是从倾斜方向接近工件的。它通常用于高精度、周期短的简单作业(无附加作业),而且大多采用气压驱动方式。由图3.7可知,该类机型约占全部取出机器人数量的39%。不过,随着高性能取出机器人价格的下降,它的用量正在逐步减少。

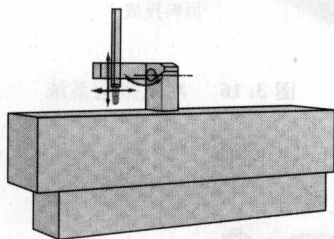


图 3.8 摇臂式

2. 直角坐标式

直角坐标式取出机器人(图3.9)是目前取出机器人的主流,占全部取出机器人总数的59%。它的优点是结构易于模块化,改变动作行程方便,操作简单。它的轴数为从2~5轴,既适合普通取出作业,也适合周期短的多种用途。它的驱动方式有气动驱动和伺服

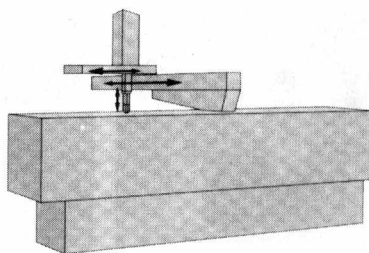


图 3.9 直角坐标式

不论是摇臂式,还是直角坐标式,它们的主要用途是成品的取出。如果在此基础上增加气动驱动设备以实现浇口的切除(gate cutting)、装配等附加作业,就还可以构成其他专用设备。

3. 多关节式

关节自由度较多的多关节机器人(图3.10)可以用于取出作业后再附带自动地完成一些更复杂的作业,如浇口切除、倒角、装配等附加作业和后续工序处理等。

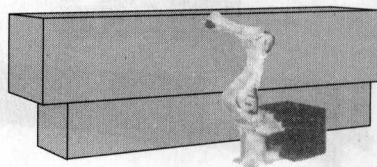


图 3.10 多关节式

图3.11为多关节机器人的应用实例。机器人被安装在成型机一侧,可以进行工件取出和码垛等作业。

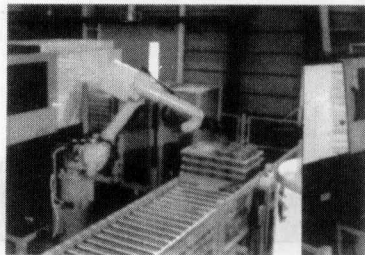


图 3.11 多关节式应用举例1(FANUC)

在成型机一侧配置多关节式机器人的缺点是占地面积大,而且机器人正对成型机,给模具交换时的调整工作、维修等带来困难。因此,往往将其改成图3.12所示的小型多关节机器人,将其安装在成型机的上部,并设法

将传送带安装在小型机器人的工作空间内。

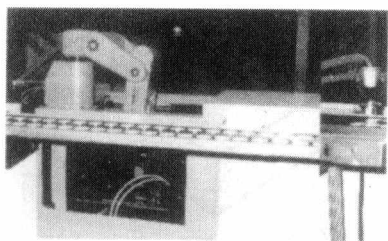


图 3.12 多关节式应用举例 2(FANUC)

图 3.13 的配置方法弥补了传统多关节型的缺点。它是由多关节手臂和水平行走轴组合而成,由于巧妙地运用了手部的自由度,既保留了多关节胜任复杂作业的优点,又避免了落地式结构(图 3.11)占用模具正面的缺点。沿水平轴的大行程移动弥补了在图 3.12 中放置在成型机上部的小型机器人工作空间不足的问题。

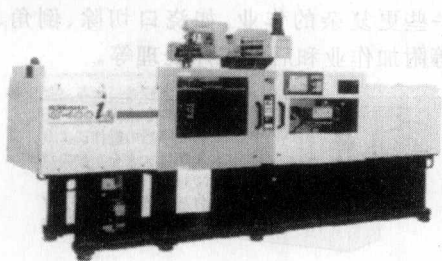


图 3.13 多关节式举例(FANUC)

图 3.14 和图 3.15 给出两个具体应用实例。机器人从成型机的上部取出工件,并将工件搬运至位于成型机一侧的传送带上,传送带位于行走轴的正下方,从而提高了空间

利用率。传送带前端配置了切除浇口装置,工件被取出后即可完成浇口切除作业。

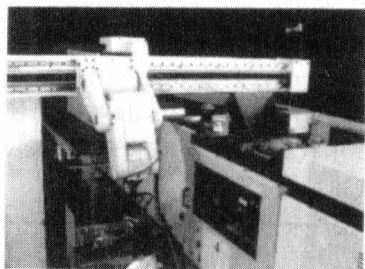


图 3.15 切除浇口作业(FANUC)

3.1.3 冲压

冲压作业发生工伤事故的概率很高,再加上其本身又属于重物搬运,不少身强力壮的年轻工人都敬而远之。改善作业环境和提高生产率的措施之一是引入机器人。

图 3.16 给出一个冲压搬运系统。生产线分为原料投放、冲压机之间的传送、工件码垛三个部分。

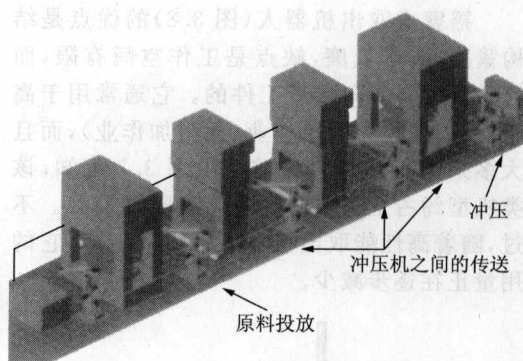


图 3.16 冲压搬运系统

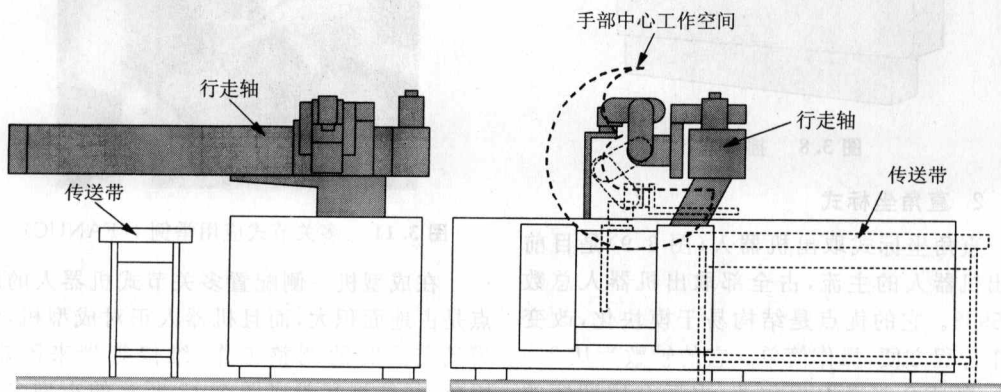


图 3.14 多关节式应用举例 3

1. 原料投放

图 3.17 给出了原料投放工序的示意图。机器人将钢板投放到第一台冲压机中,为了避免发生钢板之间的粘连,防止多张钢板同时被送入冲压机(press machine),系统中或配备了防止钢板粘连的分离装置,或安装了确认钢板厚度的传感器。

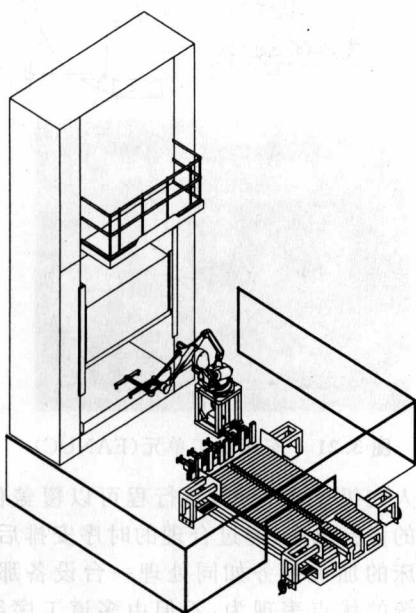


图 3.17 原料投放工序

2. 冲压机间搬运

图 3.18 为冲压机间搬运应用的例子。应根据冲压工件的尺寸、倾斜、正反向的要求,以及冲压机之间的距离等状况构建最适合的系统。

1		机器人被悬置于顶棚上,这样就能够搬运倾斜薄板(倾斜是为机器人手部交换模具提供运动自由度所需的空间)
2		利用翻转台架实现薄板翻转输送、顺序输送、90°/180°输送(或不翻转) 手腕为3轴,可以处理倾斜薄板

图 3.18 冲压机间搬运的应用举例

3		加装行走轴,在冲压机5~8m的隔距中设置1台机器人 将其固定在地面上,以便维修方便
4		采用长手臂,在冲压机5~7m的间距中安装1台机器人 能保证模具交换空间 固定在地面上,以便维修方便
5		机器人悬置于顶棚上,以保证模具交换空间 做单摆状动作,使冲压机间距内可以配置1台机器人 增加手腕轴,可以调整侧摇方向和滚动方向的姿态
6		多种冲压机之间的输送 将悬置于顶棚上的机器人和长手臂进行组合,以保证模具的交换空间
7		适合C形冲压机之间的传送 可以同时搬运工件和切屑 将切屑排放至模具外

图 3.18 冲压机间搬运的应用举例(续)

3. 码 垛

图 3.19 为码垛应用的例子。制品从最后一台冲压机送出来后由传送带送出,机器人借助位于传送带上部的视觉传感器(vision sensor)辨识工件的位置和方向,与传送带同步地取出制品。

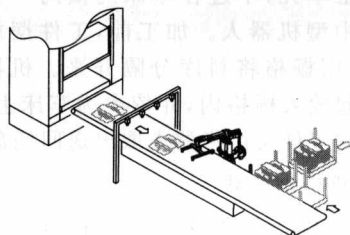


图 3.19 码垛工序

由于采用了视觉传感器,就无需对工件进行定位了,因而它可以适应多品种的生产需要。

3.1.4 机械加工

1. 机械加工单元

图 3.20 和图 3.21 为典型的机械加工单元实例。

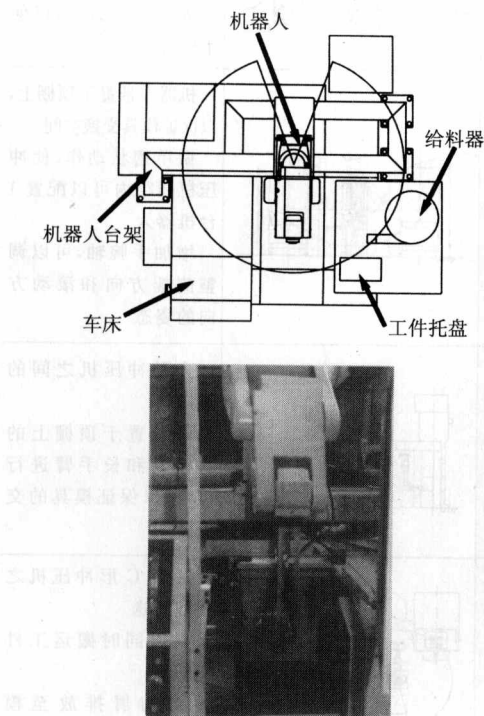


图 3.20 车床加工单元(FANUC)

图 3.20 所示的加工单元的加工对象是质量为 1kg 左右的小型工件,要求加工单元系统的成本低、结构紧凑。材料由给料器(parts feeder)提供,经过固定在车床上部的小型机器人向车床送料,加工完毕的零件由机器人取出后送入托盘。

图 3.21 给出大致符合上述要求的小型工件加工单元,不过在车床的横向一侧固定了 1 台中型机器人。加工前,工件摆放在托盘中,并用栅格将料库分隔开来。机器人将托盘提起放入栅格内,并依次为车床上料,加工完毕的工件又由机器人取出送回托盘中。

2. 机械加工线

图 3.22 为机器人将多台机床连接起来实现自动化的例子。机床上方有一根纵梁,

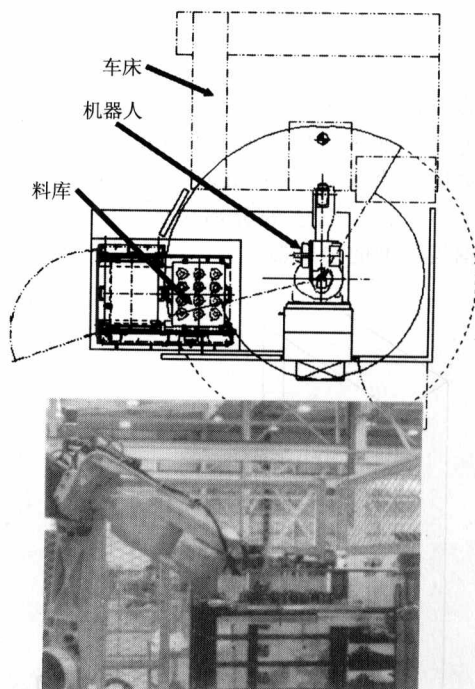


图 3.21 车床加工单元(FANUC)

机器人在纵梁上行走,其行程可以覆盖位于两侧的多台机床,经过合理的时序安排后,各台机床的加工任务如同处理一台设备那样。该系统的优点表现为:不但由多道工序组成了自动加工,而且利用了机床上方的空间,可以在现有加工设备的基础上添加其他设备,设备的维修也不受影响。

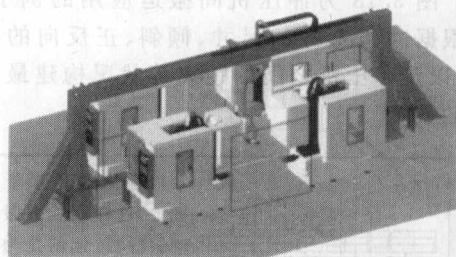


图 3.22 机床之间的输送

图 3.23 为机械加工线的例子。重型搬运机器人从自动仓库中将未加工的工件毛坯取出搬运到位于自动准备站的机械托盘上,辅助机器人紧固卡紧螺钉以便将置于机械托盘上的工件固定,装有工件的托盘由机械托盘搬运车送到加工中心进行加工,加工完毕后工件再次被送回自动仓库。该系统可以实现连续 72h 无人运转。

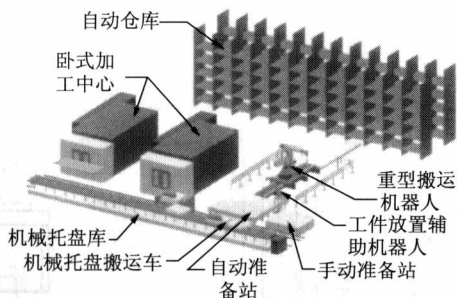


图 3.23 自动加工线

3. 关键技术

工件向机床上装卸的顺序是先卸下成品,然后再装卡待加工件。在通常情况下可以采用图 3.24 所示的双卡盘手部结构,其中一个卡盘抓取待加工件,一旦机床加工完的工件被卸下,即可立即将待加工件装上,节省了机器人的动作空行程,缩短了工作时间。

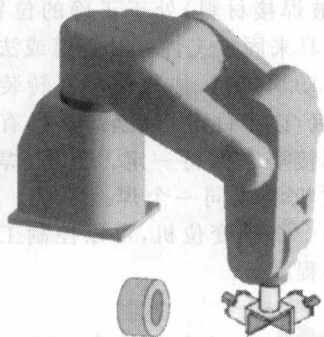


图 3.24 双卡盘手部

工件装卡到机床上时候,若出现安装倾斜,就会造成加工尺寸不正确。因此,对于无人自动化加工来说,正确装卡是极其重要的。

为了克服这一缺点,通常在机器人的手部设有浮动装置,利用压紧卡盘达到卡紧的目的。不过,20 世纪 90 年代后半期,随着机器人伺服控制技术发展的,利用机器人伺服刚性在特定方向上暂时弱化的方法可以使面与面之间很好贴合(图 3.25)。这样就能够简化手部结构,提高装卡的可靠性,从而提高整个加工单元的可靠性。

机器人被引入机械加工时,可能遇到切削液、洗净液、切屑飞溅等环境,此时应考虑机器人的防尘、防水结构和耐腐蚀性能等措施。

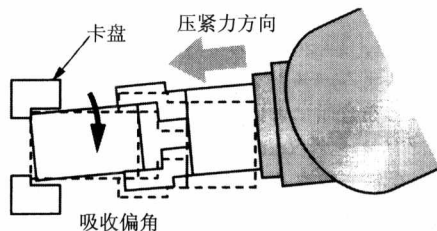


图 3.25 浮动装卡

20 世纪 90 年代,环境保护运动高涨,不含矿物油的水溶性切削液和洗净液的使用越来越多。为了提高水溶性液体的切削性能和清洗性能,通常要添加各种添加成分,因此还必须事先了解这些成分是否会对机器人的涂层构成伤害。

木下 聪 安村充弘

3.2 焊 接

在日本,焊接机器人的国产化始于 1968 年,可以说它在产业中应用的历史相当长,JIS Z 3001 的“焊接用语”中给出了焊接机器人的定义。焊接的种类非常多,包括热切断在内。机器人适用于包括弧焊(包括等离子弧焊)、点焊、激光加工等焊接装置的焊接作业^[1]。

3.2.1 弧 焊

1. 弧焊的原理

弧焊是在电极与焊接母材之间接上电源装置,其间通以低电压、大电流,在放电作用下产生电弧,电弧又产生巨大热量使母材(有时因焊接方式不同,还包括焊接线材在内)熔化并连接在一起。弧焊的焊接强度高,焊缝的水密性和气密性好,可以减轻构造件的质量,因此其广泛应用于造船、建筑、工业机械、车辆等领域。

根据是否为消耗电极,弧焊分为熔极式和非熔极式两种。熔极式有保护弧焊、气体保护弧焊、自保护弧焊、埋弧焊等,非熔极式有钨极惰性气体保护焊(TIG: Tungsten Inert Gas)、等离子弧焊(后述)等。弧焊机器人不受焊接姿态的限制,而且电弧看得见,容易控制,所以气体保护弧焊中的金属极气体保护焊(MAG: Metal Active Gas)、金属极惰性气体保护焊(MIG: Metal Inert Gas)等的应用很广泛。由于在弧焊发生时焊丝周围不断形成氧化活性气体二氧化碳或由二氧化碳与氩气

混合的保护气流,因此其适用于软钢或低合金钢的焊接。如果仅采用二氧化碳气体保护,则称其为 CO_2 焊接。MIG弧焊的惰性保护气体通常为氩气或氦气等,适用于不锈钢、镍合金、铜合金等的焊接(图3.26)^[2]。

众所周知,母材焊接部位熔化得越好焊接强度越高,因此如图3.27所示设计了各种各样的坡口。母材首先应该进行开坡口加工,然后利用垫板或定位焊的方法把焊接零件按照给定的完工尺寸找正,再实施正式焊接。中厚度板往往无法一次焊透,需要通过多层焊接将焊缝填满到规定的厚度。多层焊接需要更宽的焊缝,因此经常需要让焊条沿焊缝左右摆动实施焊接。焊接熔池是焊条与母材熔化后形成混合物的部位。进行平焊时焊缝处于下方,一般在操作方面不存在任何问题,但有时现场作业会遇到立焊、横焊、仰焊等多种焊姿,为了不至于产生焊珠滴落,造成焊缝不足等焊接缺陷,通常需要调整电流值或焊条输送的速度^[3]。

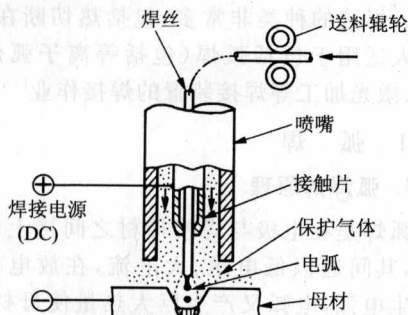


图 3.26 金属极气体保护焊原理

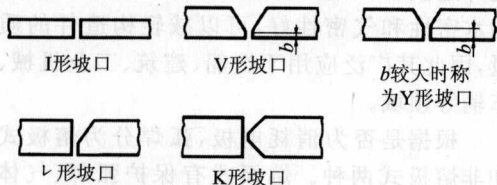


图 3.27 坡口的种类

2. 弧焊机器人

1) 构成

弧焊机器人如图3.28所示,由本体、焊接电源、焊丝输送装置、焊枪、保护气体供给装置、系统控制装置等构成。为了提高电弧传感器的检测精度(参阅后面的叙述),有时在焊枪与机器人之间没有横摆运条机构。对

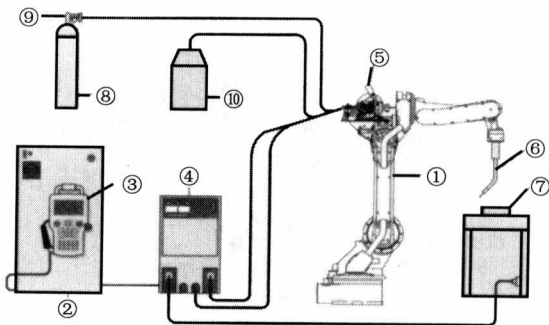


图 3.28 弧焊机器人的组成(安川电机)

①机械手 ②控制装置 ③编程示教盒

④焊接电源 ⑤焊丝输送装置 ⑥焊枪 ⑦夹具

⑧保护气体 ⑨气体调节器 ⑩焊丝

于机器人来说,焊枪是负载,因此机器人的负载重量为3~10kg,比点焊机器人少得多。

弧焊机器人的操作基本上都采取示教再现方式,因此为了让机器人与焊接对象(工件,亦即被焊接材料)处于正确的位置,通常借助于夹具来固定工件。对管道或法兰盘零件实施自动焊接时,往往使用回转装卡设备(如变位机)让工件进行旋转,这样有助于机器人的焊接姿态保持一定。于是,焊接机器人与变位机组成同一个焊接系统。图3.29所示为一个2轴变位机,可以控制工件的方向和倾斜程度。

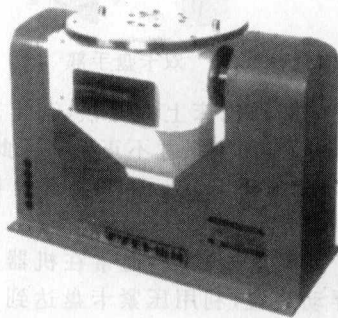


图 3.29 2轴变位机(松本机械)

影响弧焊连续运转的因素有焊渣的去除、喷嘴交换(多层焊时)、喷嘴清理等。

焊渣是焊条经过后在焊缝表面堆积的非金属生成物。焊渣在多层堆焊的焊接接头处往往造成夹渣和夹焊。因此,在进行自动焊接时,需要暂时停止焊接一段时间以便进行人工除渣。自动除渣的方法也很多,利用自动工具交换装置更换焊枪和渣铲的方法也已

经实用化了。还可以给渣铲装上阻尼机构,以免给机器人施加额外的作用力^[4,5]。

之所以要更换喷嘴,是因为在较深焊缝的焊接过程中,第一层、第二层,以及其他各层有时需要采用不同形状的喷嘴进行施焊,只有喷嘴交换装置能够应付这个问题。

喷嘴沾上焊渣会降低保护性能,造成焊坑和气孔。因此,在焊接过程中需要借助于焊枪清理器进行清理。

如果焊接机器人系统包含上述可动工具或周边设备,那么需要在机器人的动作程序中反映出来,从控制角度加以协调。

2) 弧焊的控制

弧焊机器人总是沿着焊接线移动焊枪,为了得到高质量的焊缝,焊枪的运动必须与熟练工人不相上下。应该将影响焊接质量的焊接规范(电流、电压、速度等)和焊枪角度(前后接近角、水平角),以及堆焊时多条焊接路径、焊接电流、定位点等要素实现数字化,以此生成焊接程序。此外,焊接对象(工件)还应该根据安装精度、焊接过程中变形造成的焊接线或坡口缝隙的位移和错位作相应的调整。因此,检测焊接线位置、长度、坡口宽度并向焊接动作反馈的传感器是必不可少的。

有一种“非感知传感器”具有上述功能,即线接触传感器和电弧传感器。直至20世纪90年代后半期才开始使用激光传感器。

焊接前在母材和焊丝之间施加一定的电压,线接触传感器与两者接触,产生电压降从而检测工件位置和坡口位置,并将这些信息用于示教程序中示教点位置的修正。位置修正的目的不同,就衍生出不同的感知形式,例如,反映所有示教点误差的3方向感知、给定始点和终点的焊接长度感知、将焊接起始点作为坡口中央位置的起始点感知、接缝形状无法应用3方向感知时改成检测坡口附近的杠杆式感知、由于坡口错位引起的焊缝高度不足或焊接不良的感知等。如果在焊丝端部附着有焊渣,则无法检测出正确的位置,因此有时还需要辅以焊丝切断器等周边设备^[6]。

电弧传感器的作用是检测焊接过程中焊枪前端中心送来的焊丝位置信息,并通过沿焊接线正交方向焊枪摇摆运条运动来捕捉随

焊接电弧变化的电流变化,以保持焊接线与焊枪端部中心位置重合。

为了降低激光传感器受电弧的干扰影响,通常采用高频脉冲激光。激光照射到焊缝部位后反射回来被传感器的接收器感知,然后根据激光的角度和接收器接收反射光的位置,利用三角测量法计算出坡口截面的形状,于是可以根据焊接线、焊缝间隙的宽度、坡口截面积等调节焊接条件以实现实时控制。不过,这种方法要求在焊枪周围安装传感头,所以会限制它与工件的接近程度^[7]。

在焊接机器人作业的过程中有时会发生灭弧、感知错误、喷嘴接触、焊丝粘连等异常情况。通过各种重试功能、喷嘴接触自动回避功能、焊丝粘连自动解除功能等可以减少上述异常情况的发生。

3) 离线示教系统

以焊接机器人作为中心进行规划时,除了焊接机器人外,夹具以及其上安装的工件的装卸都包含在需要一并考虑的内容中。一般来说,向焊接单元夹具里装卸工件往往需要人工的介入,于是出现了“无夹具”单元,即在单元中引进重型搬运机器人替代传统的夹具,充当工件搬运和夹具的作用,与焊接机器人协调动作。

焊接机器人的固定方式有落地式、壁挂式、顶棚悬挂式等,需要根据工件形状、焊接方向、变位机和机器人的动作进行选择。为了能适应纵长尺寸的焊接对象,通常还可以将机器人搭载在滑座上进行作业。

焊接机器人的程序必须与各种各样的焊接单元系统相适应。

离线示教系统在输入与工件相关的三维CAD数据,以及焊接线、焊接顺序、变位机转角、机器人分工(多个机器人的场合)、主程序(确定机器人开始工作→焊接动作→回避动作的轨迹数据)等诸信息后,即可自动生成机器人的执行程序。随后,对该执行程序进行干涉仿真检查,最后送到机器人控制器处。在实际的机器人上,单凭仿真是无法处置焊枪电缆等干涉问题的,因此需要在接通电弧的状态下再次检查,并据此修改程序。

离线示教系统分为专用系统和通用系统两种^[8,9]。

3. 举例:汽车排气系统零件的薄板弧焊接机器人系统^[10]

图 3.30 所示的系统采用了两台 6 轴垂直多关节机器人:一台抓取图 3.31 所示的汽车排气系统的零件消声器;另一台则搭载薄板弧焊枪,两者协调控制以实现复杂形状薄板的弧焊焊接。该系统解决了在进行薄板弧焊时往往需要在间断处或孔洞处进行手工补焊的问题,节省了工序,稳定了生产和工序管理,大幅度提高了生产效率(表 3.1,表 3.2)。

表 3.1 机器人本体的主要规格

项 目	内 容
机械结构形式	垂直多关节机器人
轴数	6 轴
额定载荷(负载重量)	6kg
位置重复精度	±0.08mm
其他	机器人控制器(可实现 27 轴、6 个系列的控制)

表 3.2 工件的规格

项 目	内 容
名称	汽车排气系统零件(消声器)
主要尺寸	150mm×250mm×150mm(W×D×H)
重量	1kg
其他	焊接处管壁厚 1mm、本体板厚 0.9mm,呈马鞍形,间隙 2mm

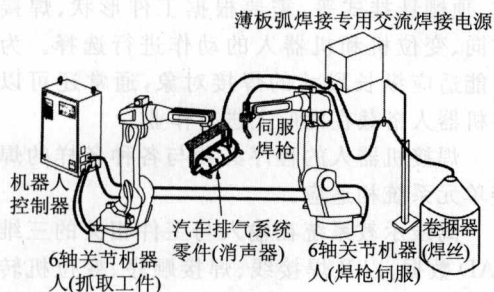


图 3.30 系统构成(安川电机)

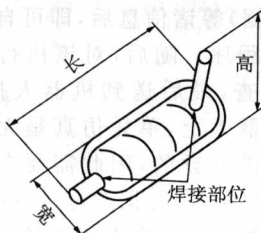


图 3.31 工件外形

3.2.2 点 焊

1. 点焊的原理^[11,12]

点焊是一种将被焊接材料重叠后用电极加压,在短时间内通以大电流,依据焦耳发热原理使加压部分局部熔化实现结合的电阻焊接方法。熔融的结合部位被称为熔核,形成熔核的焊接条件为电极前端的直径、施加的压力、焊接电流、通电时间等,与其他焊接相比点焊要求的条件相对简单,易于自动化。点焊广泛应用于汽车、家电产品。在点焊装备中有一种多点焊机,将多个电极(甚至多达 100 个)排列在一起,实施多点同时焊接,该方法适用于板厚为数微米的超精密工件直至较厚的钢板(图 3.32)。

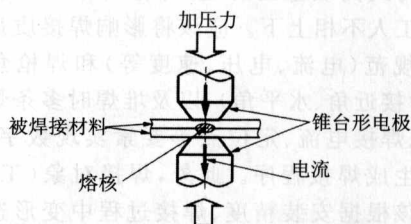


图 3.32 点焊的原理

点焊的电极除嘴状电极之外,还有背垫式组合电极等。按照焊接电流的路径来分,点焊可以分为图 3.33 所示的三大类。

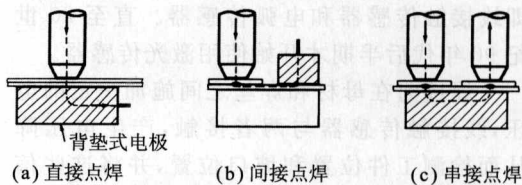


图 3.33 点焊的例子

1) 直接点焊

直接点焊是基本的焊接方法,电极直接对焊接结合部分施压,沿板厚方向通以焊接电流施焊。

2) 间接点接

该方法是在与一侧电极相隔一定距离的地方布置另一个电极,形成接通通向被焊接材料电流的路径,然后实施单点焊接。此时电极并不是焊接的对象,因此设计时应该选择足够大的面积,使之与焊接材料的接触电阻造成的升温不至于将材料熔化。该焊接方法允许将电极安排在被焊接材料的同一侧。

3) 串接点焊

串接点焊是让电流以串接的形式流过两个以上的焊接结合部分的一种施焊方法,允许在被焊接材料的同一侧配置变压器和电极。点焊中焊钳需要夹住焊接对象进行施焊,因此有时焊钳需要开口,但为了封闭开口又不得不花费很大的代价,所以在设计点焊工艺时应该避免让焊钳开口,尽量满足从一侧进行焊接的要求。

电焊机由加压机构、焊接变压器、次边导体和电极焊嘴、控制器(控制加压力、电流、时间)构成。还有定点焊机、便携式点焊机(由电极和加压装置在一起构成焊钳,能随焊点挪动)之分。

点焊焊钳的加压动力源可以使用压缩空气、空气水压(利用气水增压器)等。使用气压加压的焊钳一度应用广泛,20世纪90年代后出现的用伺服电机加压的电动伺服焊钳,实现了软施压,降低了噪声,随后出现了焊钳交换器,大大方便了不同伺服焊钳的更换^[13]。为了简化点焊焊钳的周边设备,减小次边电流的损耗,提高生产效率,可以采用图3.34所示的焊钳与变压器一体化的变压器焊钳^[14]。

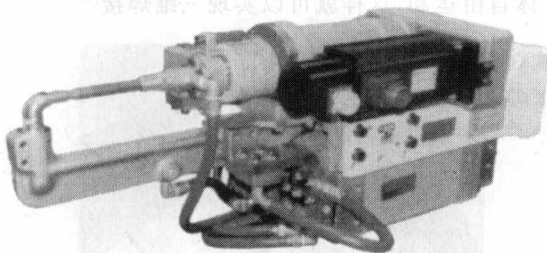


图 3.34 带变压器的机器人焊钳(井上制作所)

人们经常提到的点焊机器人,通常是指把便携式点焊机与末端执行器集成在一起的机器人系统。

2. 点焊和机器人

点焊机器人构成的生产线有两种形式:一种是让机器人抓取工件并送到点焊机的固定位置,在工件焊接位置定位后施焊;另一种是让机器人携带焊钳,待工件被搬运到某个地点并定位固定后进行施焊。应用后者时,机器人的负载重量达100~200kg,比弧焊接机器人大多。点焊机器人有一种特殊的情

况,就是将焊接电缆和水管与机器人本体一体化的问题,这样有利于避免它与周边设备发生干涉。

如果采用机器人抓取工件的形式,那么为了便于固定电缆和水管,它的手部有时需要采用旋转接头结构,这样的结构能避免在工件位姿发生改变时机器人通往手部装置的电缆和水管引起干涉^[15]。

多数点焊机器人采用再现示教控制。点焊机器人除了具有携带焊钳到工件处定位、电极加压等一连串的焊接动作控制功能外,它还具有一系列的特殊功能,包括机器人动作的修正功能(由控制器根据焊钳位置的变化计算负载变化)、高灵敏度碰撞检测功能(避免因示教误动作造成碰撞,保护焊钳和工件)、焊嘴磨损和手臂挠曲变形的修正功能、无应力焊接时焊嘴磨损的修正功能、焊钳手臂挠曲的修正功能等。

1) 点焊过程设计

例如,在汽车车箱制造的焊接装配线上,装配线的左、右、上(某些部位在下方)方都安排有焊接机器人完成高速焊接作业。1台点焊机器人搭载1台变压器焊钳(大型焊钳仍然采用传统的点焊钳)连续实施点焊焊接。也可以借助于工具的自动交换更换焊枪,减少机器人的数量和占地空间,提高单台机器人的劳动生产率。配备自动除渣器定期研磨电极能保证焊接质量的稳定性。

如果有多台机器人同时在上述装配线上进行作业,设计时就必须考虑空间的约束条件、几何限制、循环周期等,设计工作非常复杂。这时就显示出仿真的重要性了。可以用数字模型描述作业环境、机器人机构、焊钳机构等,来仿真工件打点面上焊钳位置,仿真焊钳与周边环境的干涉轨迹等,总之可以从各个方面进行机器人和工件布局的仿真和分析,最后生成合理的焊接程序。程序可以利用离线示教生成,以减轻现场生成动作程序的负担。当然也能够同时生成与可动夹具相关的互锁信号^[16]。

3. 举例:汽车车身的高密度增强点焊机器人系统^[17]

图3.35所示的系统是一条汽车车身焊接装配生产线,生产线的焊接位置上高密度地排列了多台大型机器人或小型机器人,该

工序的所有焊接作业全部由机器人完成。机器人彼此之间靠以太网进行通信,当发现其他机器人异常接近时,机器人能够采取自动减速、停止等避碰的措施。表 3.3 给出机器人的主要性能规格,表 3.4 所示为工件的主要形式。

如果打点位置、焊接条件不变,那么本系统就能够维持稳定的产品质量。由于生产线的节拍快,可以在夜间连续作业,从而提高了生产效率。

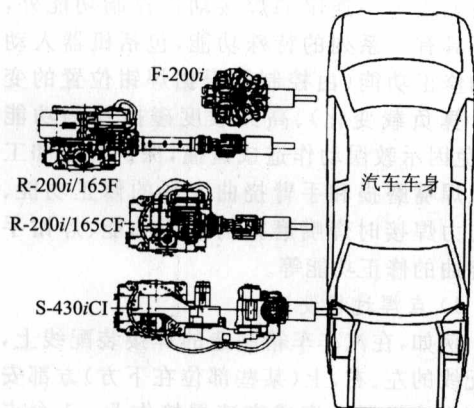


图 3.35 点焊应用举例(FANUC)

表 3.3 机器人的主要性能规格

形 式	[R-2000i/165F] [R-2000i/165CF] [S-430iCI]	[F-200i]
构 造	垂直多关节机器人	并联机器人
轴 数	6 轴	6 轴
额定负载(负载重量)	165kg(1617N)	100kg(980N)
位置重复精度	±0.3mm	±0.1mm

表 3.4 工件形式

项 目	内 容
名称	汽车车身
主要尺寸	3350mm×1420mm×980mm(W×D×H)
重量	约 400kg(3920N)

3.2.3 激光焊接·切断、激光热加工^[18]

激光束经镜头聚焦后其能量密度大大提高,如果将焦点照射到物体上,它吸收能量后温度急剧上升可以达到熔点甚至沸点。激光热加工就是利用了这个原理,通常用于表面

修复(淬火、退火、喷涂、抛光、激光蒸镀、电镀加速处理)、粘接(焊接、锡焊)、去除(切断、打孔、画线、修整、标记)等用途。

用于激光热加工的激光种类有 CO₂ 激光和 YAG 激光。前者利用金属镜面的反射,按照频率入射特定位置,做成专用设备后可以与 NC 控制装置组合起来实现加工控制。后者的功率大,可用于焊接等应用场合。激光可以沿光纤传输能量,能很方便地搭载在机器人上。

与二氧化碳电弧焊相比,激光焊接发热所产生的热变形很小。然而,仅仅利用激光焊接还很难实现有缝焊接和铝合金焊接。不过,混合 YAG 激光焊接已经面世,它将 YAG 激光焊接和电弧焊接(金属极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊)同轴集成在一个焊接头上,很适合上述焊接用途^[19]。

激光不仅适合金属,还适合塑料穿透焊接(即从透光材料的一侧照射激光,另一侧材料吸收激光完成焊接)。相比之下,用黏结剂结合塑料的方法往往需要花费一定的硬化时间,会带来某些不便。图 3.36 给出一个将加压机构和激光发射光学单元搭载在 6 轴机器人的手部上面的装置,它能相对于被加工物体自由运动,这样就可以实现三维焊接^[20]。

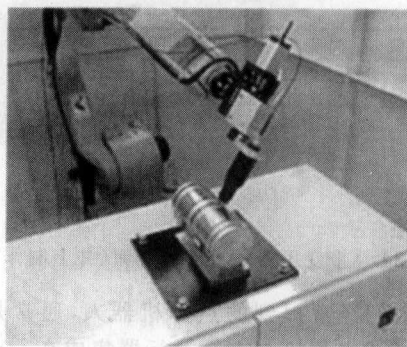


图 3.36 用于塑料穿透焊接的激光装置(富士电机)

3.2.4 等离子弧焊和等离子切割

1. 原 理

等离子弧焊是一种利用高频发生器在钨极和水冷喷嘴之间产生低电流电弧(引弧),利用电弧热使喷嘴内流出的气体离子化(这种气体称为等离子体),再由热收缩效果形成高温、高速、高能量密度的等离子电弧,将被

焊接材料熔化后再凝固的焊接方法(图 3.37)。等离子焊接仅需要母材即可,不过根据根据需要也可以向电弧提供焊丝。由于等离子电弧的能量密度高,故等离子弧焊可实现高速、低变形的快速焊接,易于焊接 I 型坡口,并可以省略坡口加工。它还有一个优点就是无焊渣飞溅,因而电极消耗小,适用于长时间稳定的焊接作业(自动焊接)。总之,它适合各个领域的应用。

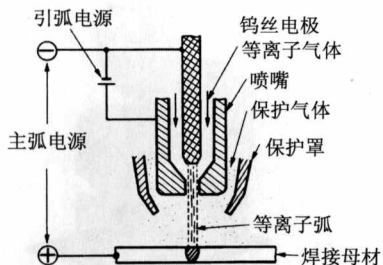


图 3.37 等离子弧焊的原理

等离子切割则是利用电弧热吹掉熔化母材实现切割的一种方法,可以按照工作气体进行分类。氧气等离子切割机(以氧气作为等离子气体)综合了等离子弧的能量和氧化反应产生的燃烧能量,它与 NC 自动控制装置组合后,可用于造船厂、钢结构桥梁制造厂的碳素钢的高速自动切割。氩氢等离子切割机(在等离子气体中混入氩气和氢气)在非铁金属,特别是不锈钢的切割中表现出优异的性能,利用氢气的还原性甚至能够切割出带有金属光泽的漂亮切口。空气等离子切割机(以空气为等离子气体)适用于进行手工切割的小型切割机^[21]。

精密等离子切割机在喷嘴和电极的形状、工作气体的旋流强度、电流控制等方面进行了优化设计,因此等离子弧的能量密度很高,与其他等离子切割机相比,它的切断精度高,而且能够大幅度减小倒角(切割面的倾斜角)和毛刺(图 3.38)^[22]。

2. 举例:精密等离子切割的车身整边

冲压加工后工件的整边和打孔通常可以借助于压力机来实施,不过有几个因素加剧了该工序的复杂程度和自动作业的难度,例如,生产批量小,压力加工的成本就会比较高;汽车生产有时需要根据加工选配部件安装孔;再加上钢板或钢材有立体切断要求等。

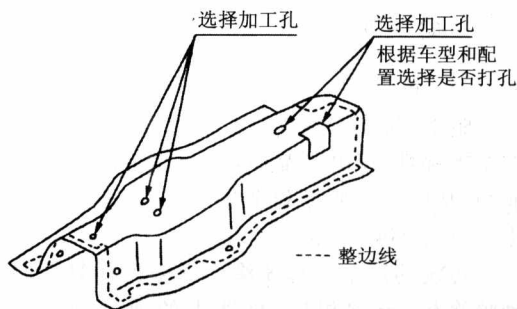


图 3.38 精密等离子切割工件

遇到这些问题,以往通用的办法是改成人工作业。不过,现在的情况已经发生了变化,因为适合小批量多品种柔性生产的由高精度等离子切割机(精密等离子切割机)和高刚性切割专用机器人组合的立体工件切割系统已经开发出来(图 3.39)。

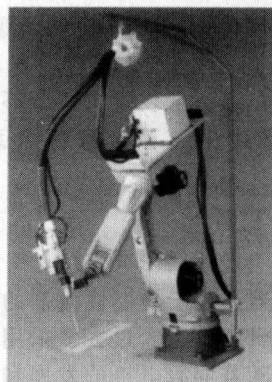


图 3.39 高刚性切割专用机器人(小松)

立体工件切割作业通常要求机器人大幅度地改变姿态。但是,如果改变姿态诱发了振动,那么就会造成锯齿状切断面,影响切断的质量。因此,对机器人控制提出了振动抑制的问题。另一个问题是切割立体工件时,内部释放的残余应力和热变形都会造成工件变形,影响到焊钳与工件之间距离的正确性。因此,有必要添加机器人焊钳位置的控制功能,以便让等离子弧电压与焊钳工件之间的距离保持正比关系。

焊接技术和切割技术在提高质量、生产效率方面的作用正日益显现出来,因此用于这个用途的机器人与其他设备组合的新生产线会继续得到开发并投入运行。

市川 诚

3.3 喷涂

3.3.1 普通喷涂

眼下,喷涂机器人被广泛引入汽车车身、汽车零部件、家电制品、塑料制品等的喷涂作业中,从所占的数量和金额来看,汽车车身喷涂占有的比重最大。

传统的汽车车身喷涂广泛采用往复式自动喷涂机,与此相比,机器人的通用性好得多,因此很多制造商正在逐步引入喷涂机器人,以淘汰往复式自动喷涂机。20世纪90年代,喷涂机器人已经成为主流。

目前,喷涂业界面临的一个共同问题是降低挥发性有机化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)排放量的问题,因为它会对地球环境造成恶劣影响。实际上,汽车车身喷涂中使用了水溶性涂料和废液回收技术,从系统的角度使上述问题得到了缓解,所以喷涂机器人正在扮演着改善地球环境的角色。本节将介绍喷涂装置内置型环境保护喷涂机器人及其在汽车车身喷涂系统中的应用。

1. 喷涂机器人

1) 概述^[1]

喷涂机器人处于易燃性溶剂的作业环境中,基于安全性的考虑,过去多采用液压式喷涂机器人。随着伺服电机的发展和控制的简化,电动式喷涂机器人成为目前的主流。在内压防爆结构方面,电动式喷涂机器人有两种选择:要么使用耐压防爆结构;要么将电机置于高于爆炸环境压力的容器中(内部压力室),构成内压防爆结构。这两种结构仅用于危险场所分类1(始终处于可能产生爆炸气体的环境)和危险场所分类2(在异常情况下可能产生爆炸气体的环境)中。

喷涂机器人本体和控制装置本身也必须做成基本安全防爆的结构(仅允许采用通信、测量、控制等低压电气设备的结构)。控制器的电路中设有齐纳屏障,使电能始终处于小于一定值的状态,避免造成火源。

各个国家都有专设认证机构负责危险场所设备的安全性认证和检查。在日本,这一机构是产业安全技术协会,美国有FMR(Factory Mutual Research, FM工厂相互研究集

团)。与其他防爆电气设备相同,喷涂机器人也必须接受这些检验机构的认定。

2) 喷涂设备内置型喷涂机器人^[2]

图3.40所示为喷涂设备内置型喷涂机器人,图3.41为该机器人的工作空间。

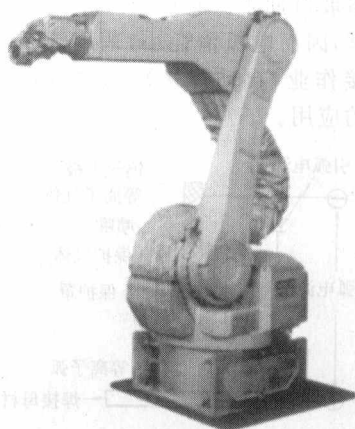


图 3.40 喷涂设备内置型喷涂机器人 (PW 20L)(不二越)

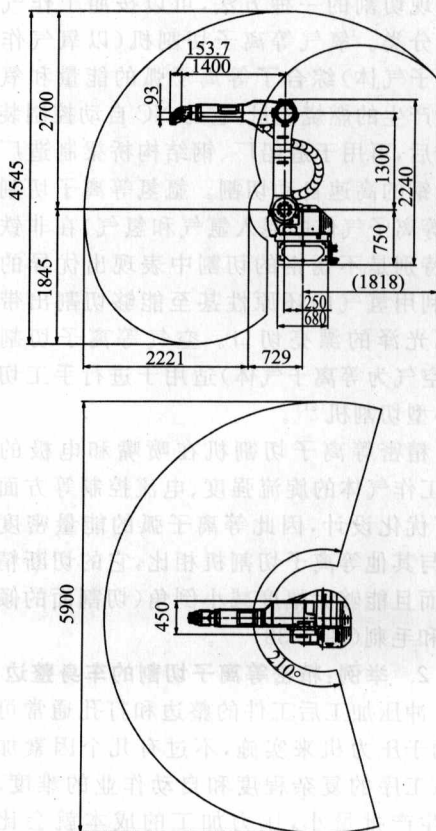


图 3.41 喷涂设备内置型喷涂机器人的工作空间(不二越)

该机器人的手臂采用铝质材料,质量轻,又借助于大功率 AC 伺服电机驱动,能获得高的加速度和快速运动。机器人本体为内压防爆结构,内压容器的内部压力始终通过压力开关进行监视,一旦发现压力低于规定压力,立即中止供电,使机器人停止动作。在接通电源或压力降低后重新上电时,它所采用的安全措施是在换气回路(在规定的时间内将容器内的气体全部排放到外部)运行周期结束之前,电源不会再度接通。

在喷涂室内使用时,应该选择防爆操作盒,如果有必要也可以单独准备仅在常态下使用的非防爆的分离示教盒。图 3.42 所示为防爆示教盒和分离示教盒。

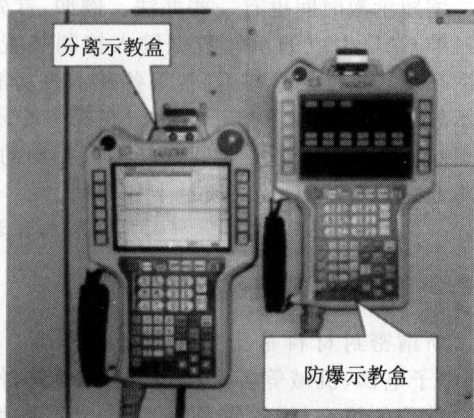


图 3.42 防爆示教盒和分离示教盒

该机器人最大的特点是喷枪软管、喷涂设备、空压机一概属于内置型(放在机器人本体内部)。具体说来,像电磁阀、电气比例阀这一类要求防爆的气压元器件都放在内压室中,气动 CCV(Color Change Value)、涂料泵等喷涂设备则放在水平手臂内。压缩空气管和涂料管从固定机座内部直通按照中空偏置结构设计的机器人手部末端,也就是说没有外露。电缆桥架的结构设计解决了从旋转底座到水平手臂之间电缆和管线的连通问题。涂料泵要求机器人扩展一个附加轴,并依靠附加的 AC 伺服电机进行驱动,由控制装置负责涂料喷出量的控制。软管和喷涂气压设备内置方式的优点如下:

① 减少喷涂系统中空压机到机器人之间的辅助压缩空气管道。

② 杜绝喷枪软管和喷涂对象之间的

干涉。

③ 减少附着在软管上的涂料的滴落。

④ 减少更换涂料颜色时,涂料和稀料的排放量。

图 3.43 所示为喷涂设备内置式机器人与传统喷涂机器人的比较。

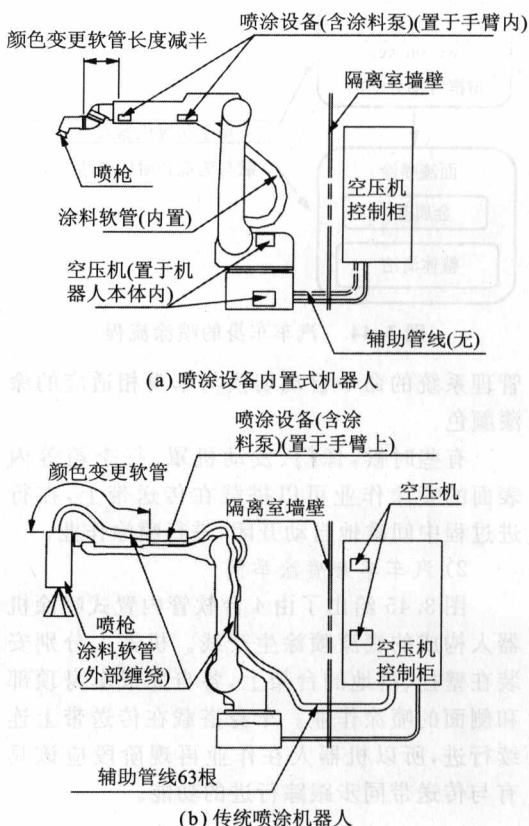


图 3.43 新旧两种喷涂机器人的比较

不过内置结构也带来了维修问题。需要在结构方面为改进维修性能作周到的考虑。例如,采用水平臂的形状,电磁阀安装板和内压室采用一体化结构,喷涂设备的组件改成轻质树脂材料,同时在中空手部安装了内部软管检修用的可卸盖板等。

2. 汽车车身喷涂系统的应用举例

1) 概述

图 3.44 所示为汽车车身的喷涂流程。

引入防爆喷涂机器人的汽车车身喷涂生产线的主要工序是中间漆喷涂(有的生产线将 wet on wet 省略)和面漆喷涂。喷涂作业是在工件随传送带的行进过程中完成的,工序中多采用静电喷涂钟形喷枪,并根据生产

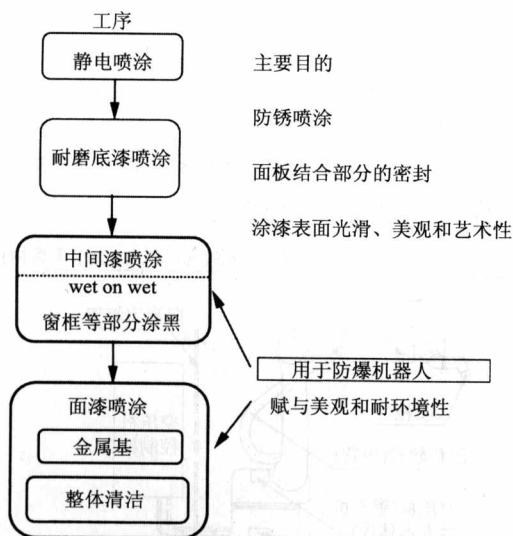


图 3.44 汽车车身的喷涂流程

管理系统的命令自动切换与车身相适应的涂漆颜色。

有些时候,像门、发动机罩、行李箱等内表面的喷涂作业可以搭载在传送带上,在行进过程中间歇地自动开闭,进行喷涂作业。

2) 汽车车身喷涂举例

图 3.45 给出了由 4 台软管内置式喷涂机器人构成的底漆喷涂生产线。机器人分别安装在壁挂、落地的台架上,各自完成车身顶部和侧面的喷涂作业。车身搭载在传送带上连续行进,所以机器人在作业再现阶段应该具有与传送带同步跟踪行进的功能。

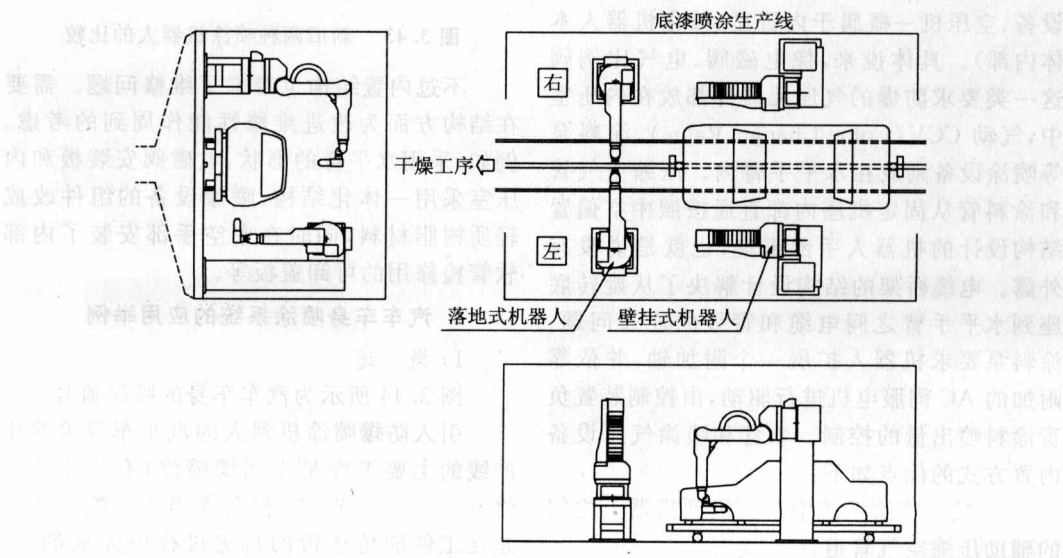


图 3.45 汽车车身喷涂应用

进行同步跟踪时,传送带实时输入的脉冲信号与传送带静止状态时记录的位置示教数据相减后得到移位量,因此即使传送带的速度发生了变化,机器人仍然能保持被喷涂对象与喷枪之间的距离和姿态不变。传送带还有互锁功能,机器人在传送带的任意位置都能实现待机功能,能够始终保持两者的联动性。

利用多台机器人的控制功能,1 台控制装置可以对 2 台机器人实施控制,因此不通过 I/O 输出即可实现左、右机器人的协调动作和相互干涉检查。所谓相互干涉检查就是工具部分在任意设定的区域发生相互重叠时必须让机器人停止动作的功能,由此可以避免因误操作或示教错误引起的碰撞。

缩短示教时间也有一些办法。例如,首先将三维 CAD 生成的示教数据输入控制装置,然后在现场借助于平移、旋转等各种示教功能对示教数据进行位置修正。由于在每一个示教点涂料喷射的 on/off 时间都是可以控制的,这对缩短调整时间、提高质量十分有利。

木本真之

3.3.2 密封材料的喷涂

所谓密封材料是指建筑、汽车、车辆、飞机、电子电器、机械等各个工业领域中结构件接口部位的填充材料,它是提高密封性、防腐蚀性、隔热性(某些场合)、防振性的材料的总称。

在下面介绍的应用例子中,一个是汽车车身装配工序中的密封材料涂布作业,该作业已经大量采用机器人了;另一个严格说来不能算是密封材料,但对机器人提出的功能要求是相同的,即黏结剂的涂布作业。

汽车车身需要涂布密封材料的部位很多,从车窗玻璃黏结剂涂布到车门、发动机罩边缘部分的密封材料涂布,不过各个部分在技术上存在少许区别。

图 3.46 所示为汽车制造工序中涉及密封材料涂布的部位,表 3.5 给出汽车中主要密封基体材料和用途。

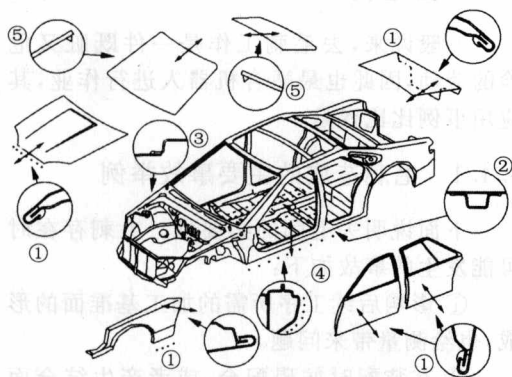


图 3.46 汽车密封材料涂布部位

- ① 接缝部位 ② 钢板结合部位
③ 钢板边缘部位 ④ 倒角损伤部位
⑤ 玻璃边缘部位

表 3.5 用于汽车制造的密封基体材料和用途

密封基体材料	使用场合	主要用途		
		防水性	黏结性	防锈
环氧类	接缝		○	○
聚氨酯类	前、后玻璃	○	○	
氯化乙烯类	门、发动机罩		○	○
热丁基类	灯、保护装置	○	○	

1. 密封材料涂布机器人系统概述

在这里对如图 3.47 所示的典型的密封材料涂布机器人系统加以说明。该系统适用于热硬性树脂卷边的涂布工序,在进行静电喷涂后可以保证车身钢板边缘具有较好的防水性。

1) 密封涂布机器人

适合密封材料涂布作业的机器人应该具有如下特点:

- ① 在密封涂布速度方面,机器人前端应

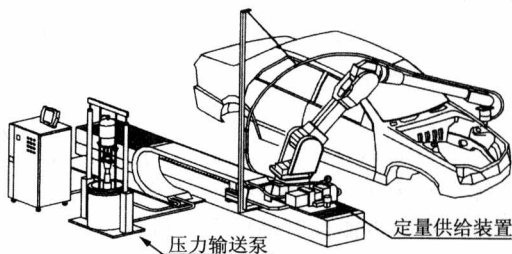


图 3.47 密封材料涂布机器人系统

该在运动学方面满足给定的平滑轨迹精度和恒定涂布速度的特性要求。为此,机器人控制系统采用前馈控制,以便在高速运动区域内抑制手臂的振动。2000 年以后出售的机器人都具有最优速度控制功能,即随曲线轨迹的曲率能对速度进行自动控制。

② 机器人工作空间应该覆盖汽车车身的一半以上。为此,机器人配置了行走装置(图 3.47)。

③ 为了能达到车身内部的涂布部位,机器人手臂应该呈细长形状,能从车窗伸入到车身内部进行作业,而且手部结构也应该十分紧凑。

④ 应该将机器人运动速度的控制和材料定量供给装置的供给量控制实施联动,以保证密封材料涂布量的稳定性,此项将在后述的 3) 中详细叙述。

⑤ 由于前后各个工序联动(通信)的需要,汽车生产线应该具备网络通信功能。此外,机器人应具有基于图像处理的位置修正功能,以便克服车身定位精度的误差。此项将在后述的 4) 中详细叙述。

2) 材料压力输送泵

图 3.47 中标注的压力输送泵属于小容量供给泵,喷涂材料被容纳在铁桶或白铁皮桶中,借助于往复气缸产生 4.9~19.6MPa 的压力输送喷涂材料。有些汽车生产线也使用大型箱式容器。

3) 材料定量供给装置(伺服分配器)

上一小节中提到的压力输送泵有一些缺点,如在压气缸的升降死点会引起压力脉动,无法以稳定的流量来涂布密封材料,气缸行程固定,无法调节输送材料的流量等,因此在 1990 年以后,机器人密封系统开始流行材料定量供给装置。该装置的功能如下:

- ① 以伺服电机为泵的驱动源,便于同时

接受机器人控制器的控制。

② 可以正确控制材料的输出量和压力。

③ 检测到压力异常时能发出在线警报信号。

④ 材料循环应该具有暖启动模式。即生产线长期停止时仍然能保持材料的循环,这样再次启动也能及时提供密封材料。

4) 系统控制装置

密封材料涂布机器人系统控制器必须具有以下功能。实际上,所有的这些功能目前都已经嵌入到机器人控制器中。

① 监视材料供应量、温度、断料等异常状态的功能。

② 根据本体位置检测结果对密封材料涂布位置进行修正的功能。图 3.48 所示为本体位置的三维检测系统。

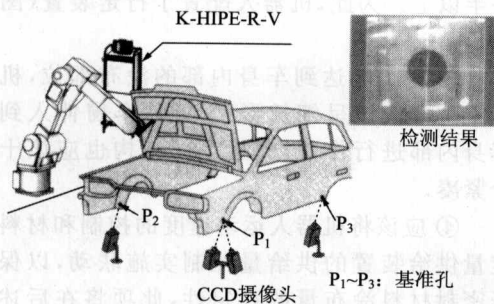


图 3.48 车身位置的三维检测系统

2. 密封材料涂布生产线

图 3.49 所示的汽车车身涂装线可以同时进行耐划痕 PVC 喷涂和密封材料涂布,在该系统中机器人是立体布置的,使工作空间利用效率得到大幅度提高。

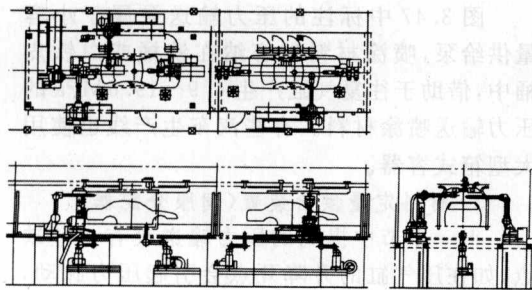


图 3.49 密封材料涂布生产线

1) 系统构成

① 密封材料涂布机器人 6 台, PVC 喷涂机器人 2 台。

② 发动机罩、行李箱开闭机器人 2 台。

③ 系统控制器,视觉系统等。

④ 材料供给装置。

2) 生产线性性能规格

① 生产能力, 1.8min/台。

② 适应车型, 8 种。

③ 密封部位, 行李箱、发动机室、轮毂、后桥箱、室内。

④ PVC 涂布部位, 底盘背面、仪表板内侧。

加纳雄三

3.4 去毛刺

一般说来,去毛刺工作是一件既脏又危险的劳动,因此也最适合机器人进行作业,其应用事例比比皆是。

3.4.1 毛刺造成的主要事故举例

下面说明去毛刺的必要性。毛刺存在时可能发生的事故如下:

① 影响后续工序所需的加工基准面的形成,也给测量带来问题。

② 在装配时妨碍配合,或者产生结合面缝隙等(特别是在进行自动装配中,毛刺往往造成整个装配线故障或停顿)。

③ 在零件加工工序或成品处理过程中,对人体造成伤害(不管是零件搬运还是成品处理,有时会发生意想不到的伤害,甚至发生 PL 问题。对玩具、家用制品来说它应该成为商品试验的重要检测内容之一)。

为了避免上述各种事故的发生,不同情况对工件边缘的加工质量有不同要求。因此,需要从生产设计、工程设计、零件加工方法和条件、对去毛刺和倒角来说最佳的边缘加工方法等方面加以周到的考虑,以保证工件边缘加工的质量。

去毛刺的最终目标是确立一套理论和具体技术,以便经济地满足边缘加工质量的要求。下面就作一些讨论。

3.4.2 去毛刺成本最小化的主要事项

去毛刺成本最小化的主要事项如下:

① 弄清楚所有边缘的毛刺是否一概需要去除,分析其对质量的影响。

② 考虑毛刺、倒角等边缘的测量方法,以

及毛刺的许可范围。

③ 毛刺会诱发什么故障,使用夹具能否减少故障。

④ 能否通过加工工序的变更减少毛刺的产生或便于去除毛刺,以及通过工具和加工条件的变更能否将毛刺减小。

⑤ 如何选择最恰当的毛刺去除方法,以及在生产线中如何实现去毛刺的自动化。

⑥ 如何制定多品种小批量部件去毛刺合理性的原则。

⑦ 机器人去毛刺是否可行,最恰当的工具是什么。

3.4.3 去毛刺系统应具备的功能和关键技术

毛刺的主要分类如图 3.50 所示。不过,在各种加工作业中,毛刺的材料、形状、数量会有很大差异。

毛刺产生的原因存在多种不确定因素,包括模型长年产生的变形,环境温度,刀具切削刃的变形,模型之间特性的区别等。因此,可以想象毛刺的分散性管理是十分困难的。当然,如果采取手工作业,对人来说应付毛刺的分散性不是什么难事。

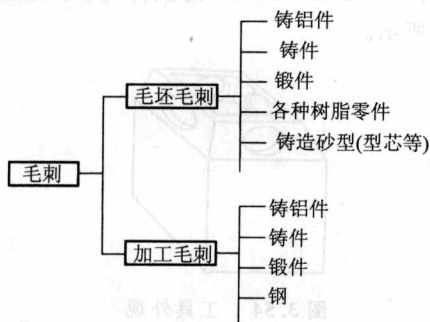


图 3.50 毛刺的分类

机器人去毛刺所必需的功能和关键技术可以分为如下两种：

① 机器人本体所必需的功能。

② 系统所必需的关键技术。

更细致的分类如图 3.51 所示。在实际加工中,必须十分清楚毛刺的性质(即工件的毛刺是在哪道工序产生的和如何产生的,毛刺的状态有无变化等)再来考虑系统的构成,并在此基础上构建系统。其中,最为重要的问题是加工技术的优化和机器人的智能化,说它们是构建去毛刺系统的难题也毫不为过。

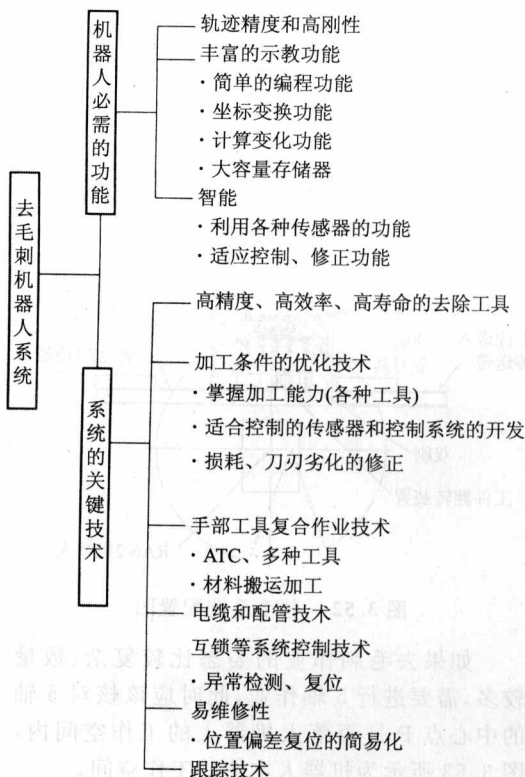


图 3.51 去毛刺加工机器人系统所必需的功能和关键技术

在图 3.51 中的关键技术包含加工技术的优化问题,这涉及选择适合实际制品毛刺加工的工具问题、条件改变与刀具寿命的关系(根据需要可以采用实验方法)等。此外,机器人必须具有智能,其中最重要的智能有过载保护、砂轮磨损补偿等。下面举例对其进行具体说明。

1. 在毛坯去毛刺作业中引进机器人的例子(之一)

本系统的工作过程大致为机器人手部抓取由送入传送带送来的工件,用硬质合金刀具、刷子、钻头、砂带抛光机等各种工具反复去除毛刺。该工序完毕后,工件被转移到送出传送带上。

图 3.52 给出了整个系统的配置图。机器人去毛刺的目的如下:

① 避免因人工作业引起的加工尺寸不一致→稳定质量。

② 消除因繁琐作业引起的疲劳导致生产率下降→稳定生产率。

③ 避免去毛刺作业产生的粉尘污染和意外的人身伤害——确保健康、安全。

选择机器人时的注意事项如下：

- ① 负载重量。
- ② 工作空间。
- ③ 根据作业内容决定工件的姿态。
- ④ 生产节拍、最高速度和加速度。

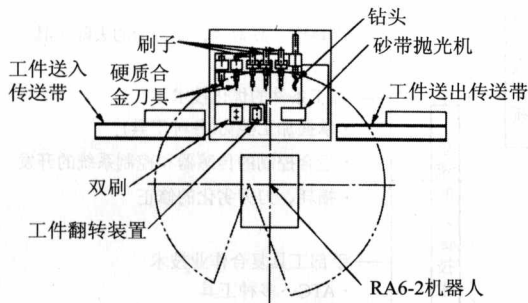


图 3.52 整个系统配置图

如果去毛刺作业的姿态比较复杂、数量较多,需要进行 5 轴作业,此时应该核对 5 轴的中心点 P 是否落入机器人的工作空间内,图 3.53 所示为机器人本体的工作空间。

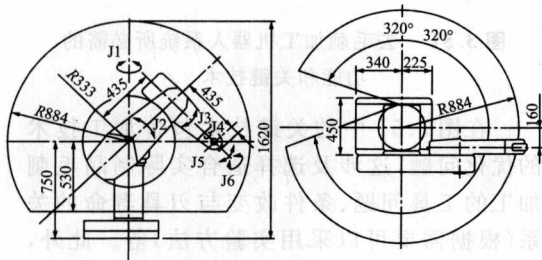


图 3.53 RA6-2 机器人的工作空间

本系统的作业方式采取由机器人抓取工件,此时机器人手部应该注意以下几点：

- ① 足够的抓取力——避免位置偏离。
- ② 空间上的制约——确保在整个工作区内无干涉。
- ③ 工件确认的必要性——在确认工件存在后才能进行作业。
- ④ 手部安全装置的必要性——对主要部件的保护。
- ⑤ 防尘装置的必要性——防止尘埃引起的工作异常。

具体说来,由于空间狭小会引起干涉问题,手部通常采用平行开闭结构,此时执行器产生的夹紧力应该能够承受去毛刺带来的反

力。如果工件全周都需要去除毛刺,有时手爪应该能够靠向外开启涨紧工件,而且手爪端部通常被设计成浮动结构,以便它既能适应工件形状的变化,又可以始终给予工件一定的压紧力(不论有无工件),保证夹紧中工件姿态的稳定性。

为了防止手部的损坏,可以引入结构简单、动作可靠的安全销方式(机械保险方式)。就是用异径销固定旋转与自由滑动的可动部件,发生超载时,销的细部会按照设计发生折断,再由接近开关感知折断情况。从理论上说,软件也可以实现碰撞检测和手部保护机制,但它的实际保护效果和耐久性有待于进一步确认。

选定去毛刺工具时应该注意以下几点：

- ① 毛刺的性质——如有黏性、不易脱落等。
- ② 毛刺的大小——分布状态。
- ③ 毛刺的位置——能否利用已有工具。
- ④ 去毛刺量——是否满足最大去除量的要求。

- ⑤ 工具寿命——是否满足成本要求。

该系统所能处理的工件外形尺寸为 70mm×100mm×80mm 铸铁件,其外观如图 3.54 所示。

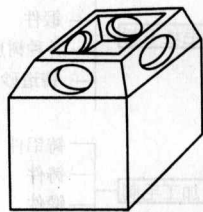


图 3.54 工具外观

去除该工件的毛刺需要四种工具,并让机器人抓取工件进行运动,依次经过各种固定的工具作业,这样就不必更换工具,能缩短生产周期。

这四种工具的情况如下：

第一种工具选用硬质合金刀具,用它来加工孔内侧各处的毛刺。刀具是硬质合金的球形刀刃,它不但精度高、寿命长,而且球面的任何位置均可以去毛刺。图 3.55 为该刀具去毛刺的示意图。

第二种工具选用刷子,它适合细长孔内侧去毛刺。刷子的心轴上植入黄铜丝,这样

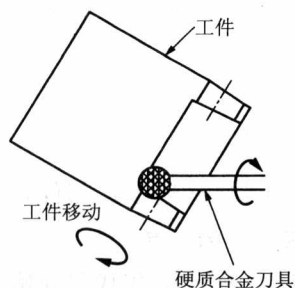


图 3.55 硬质合金刀具去毛刺的示意图

既易于插入长孔，价格又低廉。刷子除了旋转和往复进出的复合运动外，还带有侧滚，可以毫无遗漏地去除毛刺。图 3.56 为刷子去毛刺的示意图。

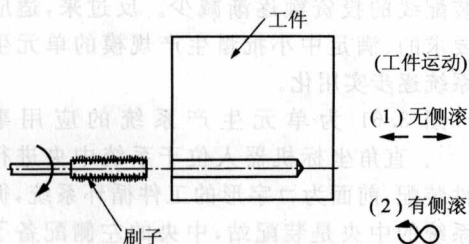


图 3.56 刷子去毛刺的示意图

第三种工具选用钻头去除孔内侧附着的坚硬型砂，这种钻头很普通，成本低、寿命长。具体方法是将比孔径小 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 的钻头插入工件中去除毛刺。

第四种工具选用砂带抛光机去除平面和棱边的毛刺。砂带抛光机的砂带上沾满砂粒，能一次性高精度地去除棱边的毛刺。具体做法就是将工件压在砂带抛光机上。为了去除各个方向的毛刺，还可以用翻转装置改换工件的抓取姿势，这样一来最初的压紧面的毛刺也能被去除掉。图 3.57 为砂带抛光机去毛刺的示意图。

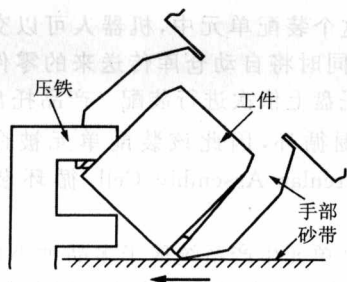


图 3.57 砂带抛光机去毛刺的示意图

为了显示工具交换的时间，每个工具在控制盒上都有计时器。这样就可以对不同寿命的工具进行寿命管理。

2. 在铸件去毛刺作业中引入机器人的例子(之二)

该系统的用途是去除砂型铸件表面的毛刺。工具采用高频砂轮机，系统中工具被固定，机器人抓取工件。这样的形式有利于多种工具同时作业。工件去除毛刺的时间由多个工具依次作业累加计时，与机器人抓取工具去除毛刺相比，这种抓取形式的缺点在于难以采用专用辅助工具，因而其生产周期较长。总之，机器人究竟是抓取工具好还是抓取工件好，这个问题需要从毛刺的位置和质量、生产周期来进行综合考量。如果选择抓取工件，那么经常将两套同样的系统并联使用可以收到生产周期减半的效果。

该系统有超载保护(停机)功能，作为毛刺加工作业超出设计范围时的安全策略。

超载停机的作用如下：

- ① 防止砂轮碎裂。
- ② 避免砂轮机电机被烧毁。
- ③ 防护机器人本体。

其原理如图 3.58 所示，附带有有一个砂轮机功率检测功能，事先设定一个超载功率值。

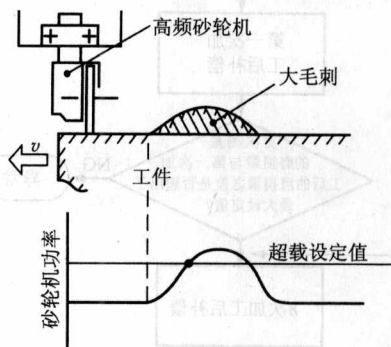


图 3.58 砂轮机超载的检测

利用砂轮磨损补偿功能可以检测出新砂轮的磨损量。由于砂轮磨损后能够得到补偿，因此即使砂轮有磨损，作业也能像新砂轮一样有效。

砂轮磨损补偿的原理如图 3.59 所示。机器人上设有激光光电开关，当它接近砂轮时，激光式光电开关瞬间检测砂轮外端，即可读取机器人的当前坐标 Q ，并补偿当前坐标

与前次检测的坐标 P 之差 ΔR 。

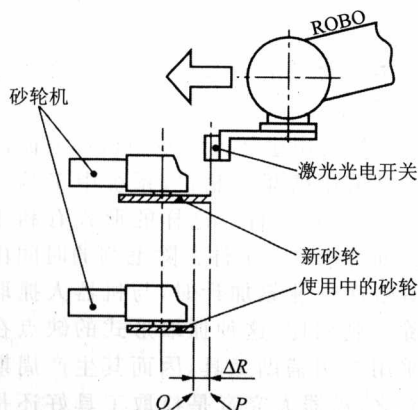


图 3.59 砂轮磨损补偿原理

实际上,砂轮磨损补偿装置会大大延长作业的周期,因此并不实用。为此,可以考虑按图 3.60 所示对其进行改造,以便缩短生产周期。

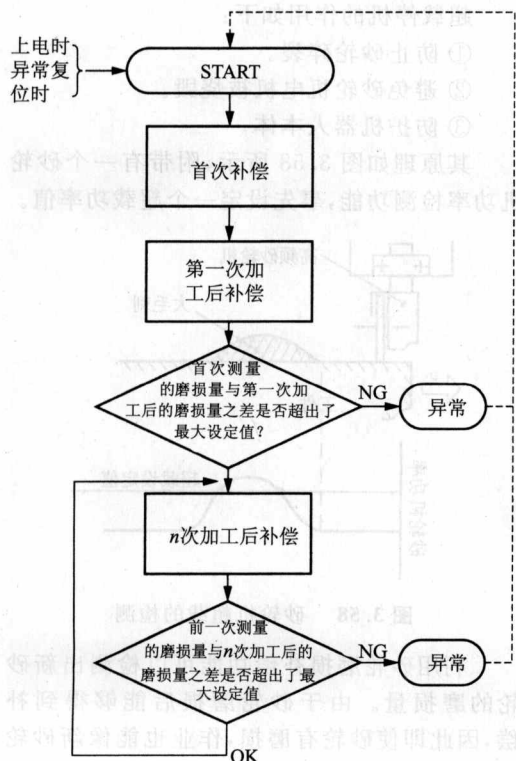


图 3.60 磨损补偿顺序图

实践说明,在构建机器人去毛刺系统方面还有许多课题有待研究。例如,安全性问题、简化多种工件更换的问题(最近要求在

10min 内完成简单更换作业的事例很多)、粉尘处理等。

成冈岑尔

3.5 装 配

3.5.1 普通装配(汽车零部件)

1. 装配工序的特点

人们从 20 世纪 80 年代就开始了机器人装配作业的自动化研究,到 80 年代后期,以家电产品、汽车零部件等大批量少品种的产品为中心,开发了多条机器人自动化装配线。不过到 90 年代后半期,用户需求的多样化和产品周期的缩短推动了多品种、小批量生产方式的增长,于是以大批量生产为目的的自动装配线的投资额逐渐减少。反过来,适应新要求的、满足中小批量生产规模的单元生产系统逐步实用化。

图 3.61 为单元生产系统的应用事例^[1,2]。直角坐标机器人位于系统中央进行零件装配,前面为 π 字形的工件循环系统,循环系统的中央是装配站,中央的左侧配备了螺钉紧固、压入等重负载作业和完成尺寸测量等高精度作业的高刚性机器人。直角坐标机器人的背面有微型自动仓库,实现零件自动供应。

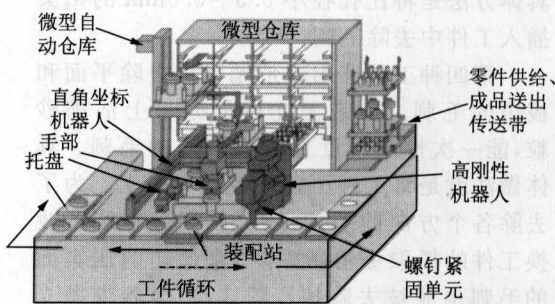


图 3.61 单元生产系统的举例

在这个装配单元中,机器人可以交换手部工具,同时将自动仓库传送来的零件摆放在产品托盘上依次进行装配。产品托盘在机器人周围循环,因此该装配单元被命名为 CAC(Circular Assembly Cell, 循环装配单元)。

这种单元生产系统属于多品种小批量生产系统,能按照产量的多少决定设备数量,提供多种系统方案。目前,这种单元生产系统

在运行方面还存在诸多问题,如零件供应、手部灵活性等,今后应该在这些方面加大开发的力度。

2. 装配机器人的种类和特点

1) 水平多关节机器人

图 3.62 为水平多关节装配机器人的例子。水平多关节机器人由连接在机座上的两个水平旋转关节(即大小臂)、沿升降方向运动的直线移动关节、末端手部旋转轴共 4 个自由度构成。它是特别为装配而开发的专用机器人,其结构特点表现为沿升降方向的刚性高,水平旋转方向的刚性低,因此称之为 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm,平面双关节型机器人)机器人。它的作业空间与占地面积比很大,使用起来很方便。

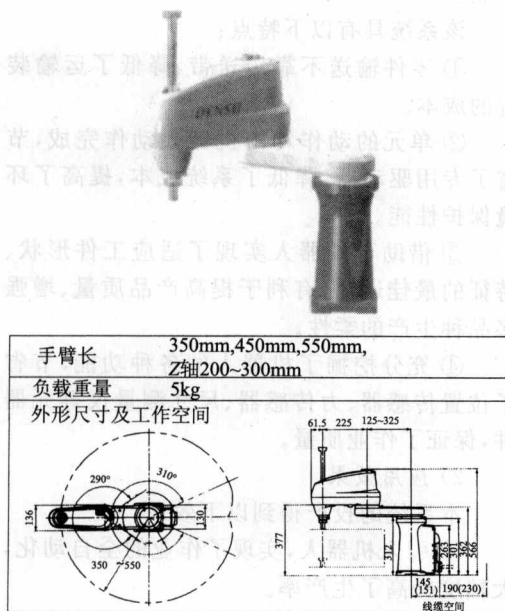


图 3.62 典型的水平多关节机器人
(DENSO WAVE)

2) 直角坐标机器人

图 3.63 为直角坐标机器人的例子。它具有 3 个直线移动关节。空间定位只需要 3 轴运动,末端姿态不发生变化。该机器人的种类繁多,从小型、廉价的桌面型到较大型应有尽有,而且可以设计成模块化结构以便加以组合,是一种很方便的机器人。它的缺点是尽管结构简单,便于与其他设备组合,但与其占地面积相比,工作空间较小。

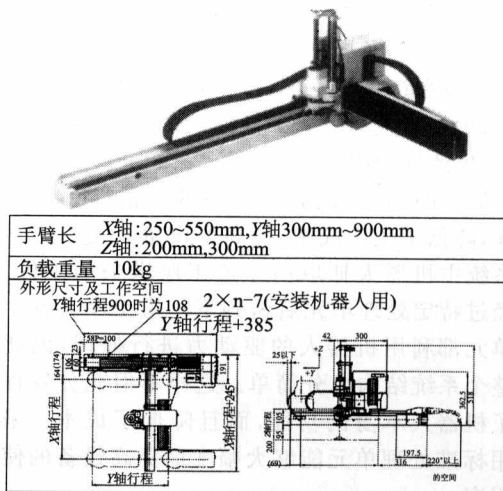


图 3.63 典型的直角坐标机器人
(DENSO WAVE)

3) 垂直多关节机器人

图 3.64 为垂直多关节机器人的例子。它通常由转动和旋转轴构成 6 自由度机器人,它的工作空间与占地面积之比是所有机器人中最大的,控制 6 自由度就可以实现位置和姿态的定位,即在工作空间内可以实现任何姿态的动作。因此,它通常用于多方向的复杂装配作业,以及有三维轨迹要求的特种作业场合。关节结构比较容易密封,因此在 10 级左右的洁净间内采用该类型机器人进行作业。装配机器人的手臂长度通常选择 500(近似人的臂长)~1500mm。

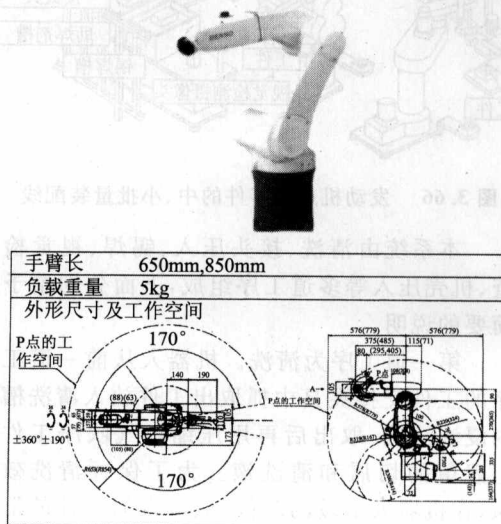


图 3.64 典型垂直多关节机器人(DENSO WAVE)

3. 装配机器人应用举例

1) 系统概述和特点

该系统用于汽车零件(发动机点火)的中、小批量生产^[3]。工件的外观如图 3.65 所示,生产线如图 3.66 所示。系统充分挖掘了机器人的功能,改善了设备的灵活性和可靠性,降低了生产成本,提高了设备利用率。本系统中机器人抓取前一道工序送来的工件,经过特定处理单元后送到下一道工序。各个单元都利用机器人的驱动力进行处理,因此整个系统结构十分简单。这样不但充分发挥了机器人本身的功能,而且降低了成本。采用标准处理单元能够大幅度地提高设备的使用率。

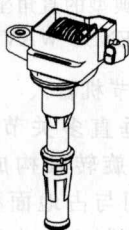


图 3.65 发动机点火部件

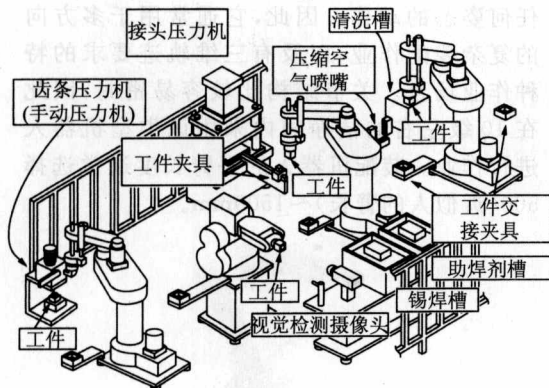


图 3.66 发动机点火零件的中、小批量装配线

本系统由清洗、接头压入、锡焊、视觉检查、机壳压入等多道工序组成,下面分别给予简要的说明。

第一道工序为清洗。机器人从前一道工序的工件交接夹具中抓取出工件放入清洗槽内浸泡清洗,取出后再用压缩空气吹净工件上残留的切屑和清洗液。为了保证清洗效果,在机器人示教的时候,应该根据工件的形状选择最佳的浸泡部位和吹气方向。

在第二道工序中,机器人保持抓取工件

的状态,同时推动工件交接夹具滑动,其结果使工件压入经接头压力机成形加工的接头中。此时,机器人运用位置检测功能能够实现接头压入力、深度、位置的调节。

第三道工序在嵌入后的工件接头上涂布助焊剂和锡焊。机器人抓取工件,将其浸泡在喷流槽中。为了获得高质量的锡焊,应该按照不同工件示教最佳浸泡条件。

在视觉检查工序中,用一台摄像机从多个方向检查工件。该系统的组成既简单,检查又可靠,还能适应多种零件。

最后一道工序是借助于齿条压力机将机壳压入的工序。机器人具有力控制功能和位置检测功能,因此能够任意控制行程和压力,它不仅能给机壳施加给定的压力,还能检测加压过程中的异常情况,随时中断压入作业。

该系统具有以下特点:

① 零件输送不靠传送带,降低了运输装置的成本。

② 单元的动作均由机器人动作完成,节省了专用驱动器,降低了系统成本,提高了环境保护性能。

③ 借助于机器人实现了适应工件形状、特征的最佳运动,有利于提高产品质量、增强多品种生产的柔性。

④ 充分挖掘了机器人的各种功能,节省了位置传感器、力传感器、尺寸测量仪等元件,保证了作业质量。

2) 应用效果

本系统的投产得到以下效果:

① 引入机器人,实现了作业的全自动化,大幅度提高了生产率。

② 节省了 4 名工人。

③ 通过发挥机器人的功能,优化运动示教,大幅度降低了废品率,实现了提高产量和稳定产品质量的目的。

④ 如果能够更换夹具,那么该系统除了能够适应同一尺寸外,还能够满足数十种型号产品的作业要求。

⑤ 使工人从焊接作业、目视检查作业等恶劣的作业环境中解脱。

⑥ 与用传送带组成的自动化生产线相比,大约降低了 40% 的设备造价。

⑦ 在设备费比例中,节省出 50% 的资金

可以转作他用。

⑧ 系统简洁,与传统自动化生产线相比可以降低50%的设备停车时间。

4. 采用装配机器人的优点

装配工序引入装配机器人的优点如下:

1) 设备的性能价格比高

由于没有辊轮等移栽装置、搬运装置,因而缩短了设计和调试周期。机器人采用标准产品,质量可靠,提高了整套设备的可靠性。由此可知,通过充分挖掘机器人的功能,缩减周边设备,可以提高系统的性能价格比。

2) 提高设备柔性

由于机器人的程序和示教内容可以进行变更,修改动作方便,即使是在系统运行中,也可以对应产品设计的变更或工序的变更。

3) 便于工艺改革

引入装配机器人后,现场操作人员能够根据对机器人的动作观察,随时修改机器人程序,缩短了生产周期,降低了废品率,提高生产率。这一点对由专用设备组成的生产线来说是做不到的,因为无论是变更夹具还是变更机械设备都很困难。在生产现场,我们可以举出许多引入机器人之后,员工围绕QC活动改革机器人作业工艺的实例,其结果是有助于大大提高现场工作人员的士气。

4) 提高设备的运转率

一般来说,产品模具的寿命到期后,专用设备也就报废了。但换成机器人后,它还可以重新构成其他设备。比如,前面提到的属于通用设备的锡焊槽,将其购入后可以立即与二手机器人组合投入使用,从而提高了设备的运转率。

如上所述,在装配工序引进机器人,除了让它发挥机器人本身的功能外,重要的是还要学习上面的例子,将它灵活运用,充分挖掘它的潜能。也就是说,对机器人的研究不局限在提高速度、精度、可靠性等基本性能方面,更要把精力放在提高性能的层面上,如发挥传感器、力控制、网络等功能。

长田道春

3.5.2 插装和表面贴装

我们现在知道,从移动电话、计算机到AV设备、家电产品,以及汽车电子产品,各种

电子设备内部的电路板的制造过程都适合引入机器人作业。

在电路板制造过程中,各种电子元器件的插装(inserting)和表面贴装(mounting)是必不可少的,从印制电路板上的电阻、电容、IC、LSI等半导体元器件,直至端子等异形元器件的装配。用于电子元器件装配的设备分别称为插件机和表面贴装机器人。它们一般被归入工业机器人的类别,其比例占到整个工业机器人的半数以上,是最大的应用领域。

1970—1980年,插件机盛行一时,其主要作业是将带引脚的电子元器件插入印制电路板中(已在特定位置钻出孔穴)进行插入作业。虽然这些作业可以由手工完成,但是自动化生产线有利于提高生产率,减少因手工作业而导致的人为错误。

20世纪80年代以后,电子设备在减小体积和减轻质量方面迅猛发展,有引脚的电子元器件逐渐被无引脚的表面封装元器件所替代。进入90年代,这一发展趋势越发明显,目前表面贴装工艺已经成为电子元件装配工艺的主流。承担表面封装工艺操作,进行电子元器件装配的设备就是表面贴装机器人。本节主要介绍这一类机器人。

1. 结构

表面贴装设备的结构大致可以分为转塔式(旋转头)和龙门式(XY直角坐标机器人)两种。本节将以结构较为简单的龙门式表面贴装机器人为例对其结构和动作加以说明。图3.67为该设备的外观,图3.68为它的基本结构。它的基本原理是元器件供给部分对应于取出位置固定,其上的送出机构将元器件送出,靠真空吸嘴或机械手爪拾取元器件,然后将其安装在事先已经定位的印制电路板的给定位置上。

利用数值控制(numerical control)反复控制这些动作就能完成电路板的表面贴装作业。实际上,前一道工序已经事先在印制电路板上涂布(或印刷)了焊剂或黏结剂,借助于它们的黏结力,电子元器件被贴附在各自相应的位置上。表面贴装工序之后的作业分两种情况处理:如果使用焊剂进行黏结,那么应该利用回流焊炉将贴装完毕的印制电路板加热,使焊接成分熔化,完成焊接;如果使用

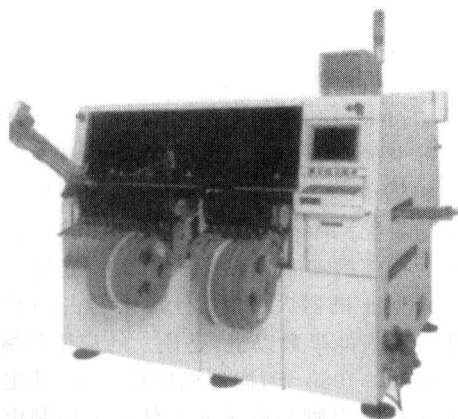


图 3.67 龙门式表面贴装机器人
(Panasonic Factory Solutions(松下生产科技公司))

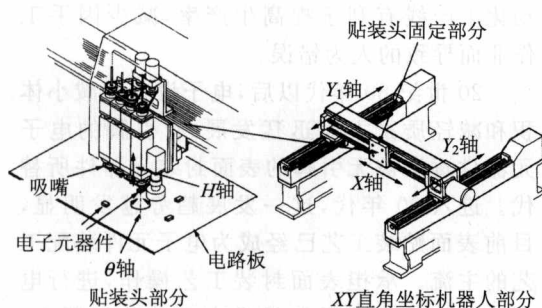


图 3.68 龙门式机器人的基本结构

黏结剂,那么应该利用专用的射流焊接使焊锡附着在焊接部位完成焊接。

机器人通过数值控制让贴装头沿 XY 轴运动,在元器件供给部分和贴装点之间不断进行移动,拾放电子元器件。贴装头的吸嘴有 2 个自由度,既可以升降又可以绕 θ 轴旋转,借助于数值控制适应元器件的不同厚度,不同贴装方位。为了提高贴装精度,近年来几乎所有的表面贴装设备都带有视觉识别修正装置。它们的作用是在拾取元器件后,以吸嘴为基准,用图像来识别元器件的位置和姿态,计算偏差量,完成贴装位置的修正。

该表面贴装设备的特点是贴装头的吸嘴和工具可以按照拾放元器件的大小进行更换,从而满足从微小到大型的各种电子元器件的表面贴装。不过,尽管它有若干个优点,由于生产率受到运动因素(移动的速度、行程等)的限制,所以目前在长时间、大批量的表面贴装工序生产中开始出现使用转塔式表面贴装机器人的倾向。

顾名思义,转塔式表面贴装机器人的贴装头上有多个吸嘴,甚至同时有多个转塔。图 3.69 所示为典型设备的外观,图 3.70 为其基本结构。龙门式表面贴装机器人由贴装头在元器件供给部分和表面贴装点之间往复移动完成作业,转塔式表面贴装机器人则不同,它的贴装头固定在机座上,以元件供给部分和承载印制电路板的 XY 工作台分别移动到转塔的元器件吸附位置和元器件贴装位置的形式完成贴装作业。如果有多个转塔并列使用,那么让元器件往复移动的形式就显现出减少转塔移动时间、元器件识别时间,实现高速贴装的优点。

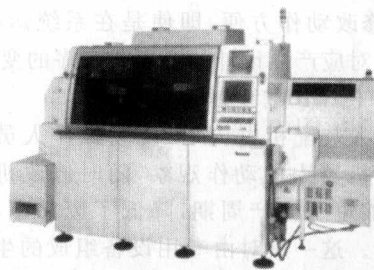


图 3.69 转塔式表面贴装机器人
(Panasonic Factory Solutions)

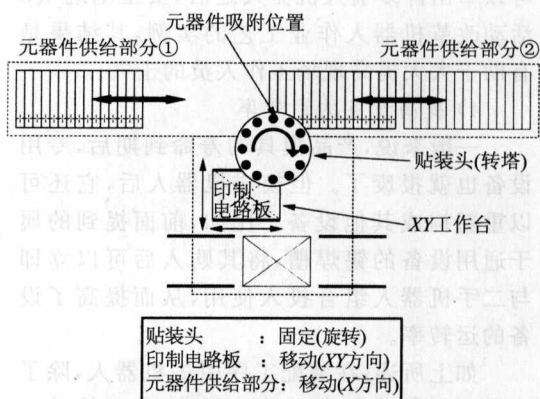


图 3.70 转塔式表面贴装机器人的基本结构

由上述可知,转塔式表面贴装机器人的元器件供给部分和承载印制电路板的 XY 工作台必须进行往复移动,为确保移动的行程,往往不得不增大设备的体积。另外,元器件与电路板之间尽管有一定的黏结力,一旦 XY 工作台承载印制电路板在贴装位置之间高速穿梭,其上面已经贴装过的元器件难免会发生些许错位,鉴于此,近几年又出现了新的结构形式。

2. 举 例

图 3.71 给出一个表面贴装机器人的例子,图 3.72 是它的基本结构。该机器人 为龙门式,为了提高生产率,采用多台套并列的形式(模块化)。其特点是在贴装头上有多个并列的吸嘴,而且一台设备有多个贴装头和 XY 机器人。

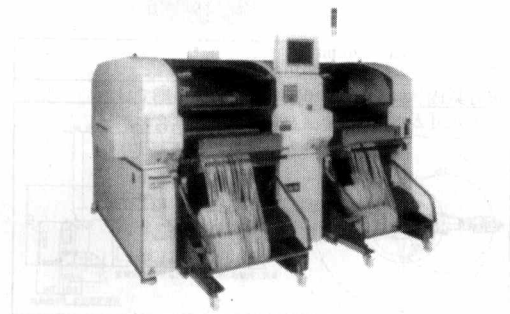


图 3.71 模块化表面贴装机器人

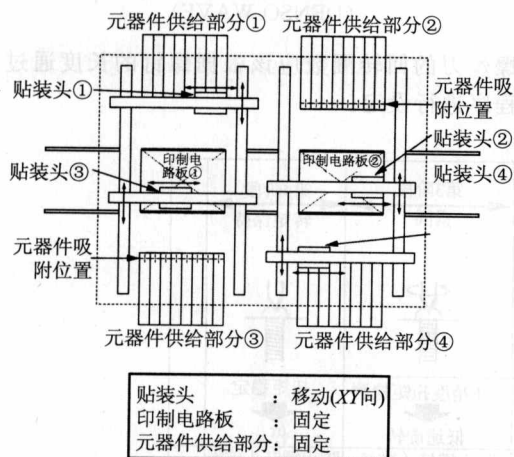


图 3.72 模块化表面贴装机器人的基本构成

如前所述,龙门式表面贴装机器人的缺点是生产率较低。这台模块化机器人为了减少在元器件供给部分和贴装位置之间往复运动的时间,利用多个吸嘴从供给部分一次拾取多个元器件,然后移至表面贴装位置,将它们依次贴装在电路板上。这样做能减少元器件供给部分与印制电路板之间的往复次数,大大提高了生产率。此外,由于一台设备搭载多个 XY 机器人和贴装头,甚至在一台机器人拾取元器件的过程中,可以让另一个机器人去进行贴装,这样就有效地弥补了时间的损失。

在上面的例子中,整个机器人系统性能

的改善与其说受惠于模块化结构和动作顺序的改进,不如说得益于控制计算机性能的提高。实际上,新设备的想法早就有了,只是一方面多个元器件的吸附、贴装动作的优化程序计算涉及多个参数,实时处理计算不过来;另一方面又无法实时验证多个机器人动作的干涉问题,因而新想法近年来一直未被采用。

直至 20 世纪 90 年代末期,随着计算机和软件技术的飞速发展,该机器人的实用化生产才出现了转机。

新型的表面贴装机器人尚属新生事物,投放生产时间不长,今后改进的空间很大。同时,我们也期待具有更高生产率、表面贴装精度、小型化的设备不断推陈出新。

远藤隆弘

3.5.3 螺钉紧固

1. 螺钉紧固作业的特点

与装配工序类似,螺钉紧固工序在多品种、中小批量生产领域中也是属于自动化进程迟缓、更多依赖手工的作业。在大批量的生产线上,一般通过螺钉紧固工具实现螺钉紧固的自动化。但是,在多品种、中小批量的生产线上,螺钉需求的种类很多,螺钉紧固条件又很复杂,无论是从自动化技术的层面,还是从经济性的层面都难以实现自动化。因此,在多品种、中小批量生产中,目前螺钉紧固的现状往往是由操作人员按照螺钉种类选择紧固工具,手工完成螺钉紧固的。如果想使这样的生产线实现自动化,并以各自的最佳条件紧固螺钉,就必须配置多台螺钉紧固工具,这意味着要求机器人具有工具交换的功能。然而,用工具交换的方法来应对多品种不仅有些勉强,而且还产生用于多个工具的设备费用多,以及工具交换会造成时间损失等自动化问题。

解决上述问题的方法是对螺钉紧固工具实施伺服控制,通过程序按照不同螺钉选择合适的紧固条件。螺钉紧固机器人的基本功能就是要达到这个目标。

2. 螺钉紧固的基本步骤

图 3.73 给出一个螺钉紧固机器人的应用实例。螺钉紧固单元固定在机器人的升降单元上,伺服电机分别控制螺钉紧固头的升降和旋转,机器人控制器的伺服控制功能

应包括螺钉入扣到旋紧的过程,螺钉压力、转速、转矩等,同时适合多品种螺钉的紧固作业。

图 3.74 给出螺钉紧固的基本步骤。为了缩短操作时间提高螺钉紧固作业的效率,必须高速完成紧固作业,若仅仅依靠简单地提高螺钉紧固速度来实现,显然会存在一些不确定因素,造成操作质量和精度下降。

图 3.74 所示的螺钉紧固过程分为 4 个阶段,设定各个阶段的最佳条件,才可能实现高速、高精度、高可靠性的螺钉紧固作业。

第 1 阶段是初始旋入的入扣阶段。此时应该控制螺钉紧固工具(螺丝刀)的转速,以最短时间进入旋入阶段,此速度不应该导致乱扣,例如,1000r/min 左右。此外,还应该施加轻微压力,既有利于入扣,又避免了工件变形。一旦螺纹旋入,螺钉的高度(螺丝刀的升降位置)就会随螺钉(螺丝刀)的旋转角度而下降,它是能否转入第 2 阶段的判别依据。

在第 2 阶段,螺丝刀的转速可以升至 3000r/min,以缩短螺钉拧入时间。第 2 阶段

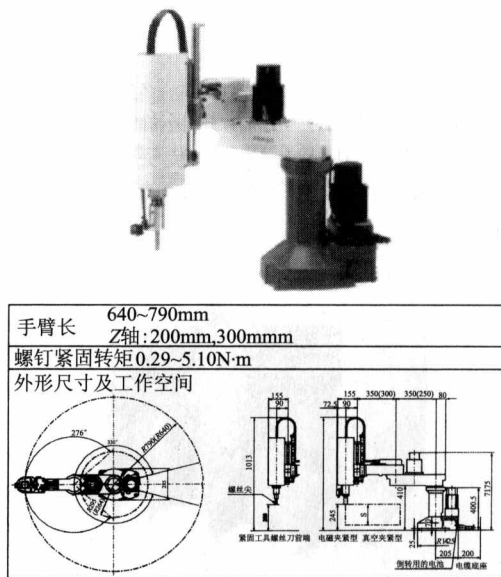


图 3.73 典型的螺钉紧固机器人 (DENSO WAVE)

螺丝刀的回转圈数应该根据螺钉的长度通过程序进行设定。

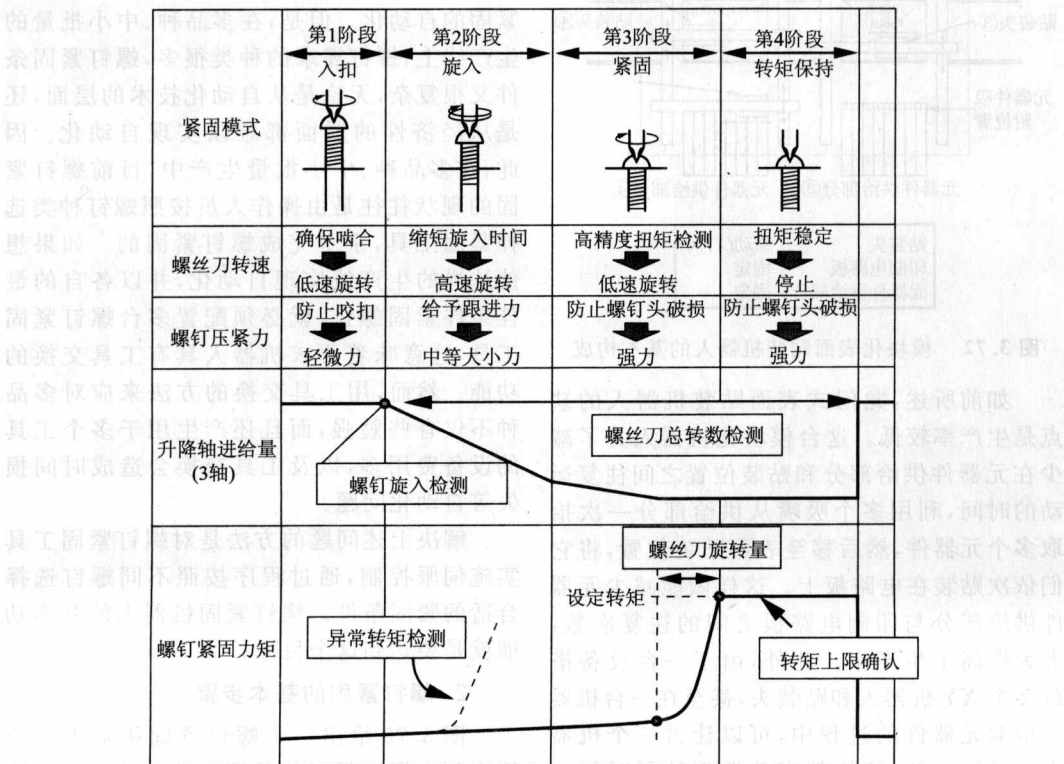


图 3.74 螺钉紧固的基本步骤和检查功能

在第3阶段,螺丝刀通常以 300r/min 的低速进行旋转,以确保扭矩施加的精度。

第4阶段的任务是确认扭矩。为了保持扭矩的稳定,应该将它保持一定的时间。

另外要注意,在第3阶段和第4阶段,为了保证螺丝刀不会从螺钉头脱离,还必须控制施加在螺钉上的压紧力的大小。

借助于机器人控制器的实时控制,可以完成高速、高精度、高可靠性的螺钉紧固。

3. 螺钉紧固的检查

图 3.74 给出在紧固螺钉的各个阶段中检测作业异常的方法。第1阶段是螺钉入扣的确认,要将次品螺钉、不同直径的螺钉、螺钉孔径的问题检测出来。在第2阶段螺钉旋入时,应该采用小转矩旋进。在这一阶段通过检测螺丝刀旋转的异常转矩,可以发现螺纹咬扣、异物进入、螺钉直径不符等情况。第3阶段检测螺钉入座后螺丝刀的旋转量。螺钉入座后,螺钉旋紧的转矩应该正比于螺纹连接部分的刚性增长,如果遇到垫片是次品,或者垫片有毛刺,这种比例关系就会失调,表现为从螺钉入座到转矩上限过程中旋转角度的异常,通过检测能够发现异常情况。在第4阶段确认转矩到达上限。如果转矩达到上限后造成螺钉变形,那么转矩反而会下降,如果转矩的控制精度不高,可以靠这一现象来检查装配不良。

从第1阶段的入扣检测到第3阶段的转矩到达上限,如果能够检测螺丝刀的旋转总量、螺钉(轴线方向)的旋入量,还可以检测出螺钉长度是否异常,以及螺钉是否会突起。

综上所述,机器人的伺服技术完全可以胜任螺钉紧固,这不仅是对转矩的上限值是否合适作出评价,还可以分阶段对紧固过程的正确性进行评价,甚至能对螺钉本身所引起的不良装配(如混入其他品种的螺钉之类的问题)进行检查。

4. 螺钉紧固机器人应用举例

1) 图 3.75 为多种螺钉紧固的例子

如上所述,螺钉紧固机器人以转矩设定为基础,再利用机器人程序,可以自由地设定螺钉紧固条件(螺丝刀的转速、压紧力等)。如果进而把螺钉种类、工件软硬程度也考虑进来,甚至可以对螺钉紧固条件的细节加以

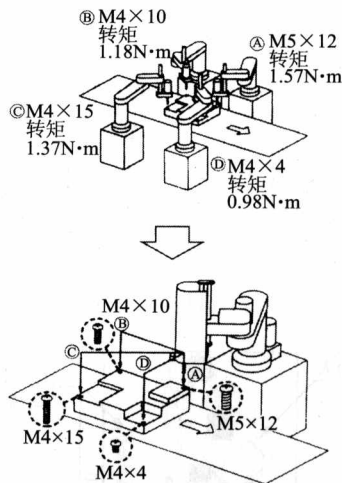


图 3.75 机器人适合多种螺钉紧固的应用实例

设定。总之,把传统的螺钉紧固工具和机器人组合起来组成一台螺钉紧固机器人,它往往可以解决以往需要几台机器人才能实现的多种螺钉紧固作业问题。

用自攻螺钉多点紧固的树脂成形工件,可以人为改变各个紧固点的紧固转矩。例如,螺孔偏大容易发生紧固不良的地点应该人为地将紧固转矩减小,而在螺孔偏小容易发生紧固不实的地点,应该人为地将紧固转矩加大。螺钉紧固机器人的优点就体现在即使工件螺孔的直径稍微有些不同也不至于影响装配,它在螺钉紧固作业中的可靠性和速度比熟练工还高。

2) 图 3.76 为用于螺纹检查工序的螺钉紧固机器人和系统平面图

该系统对螺钉紧固机器人作了改装,将螺纹塞规替代螺钉紧固工具,应用于螺纹加工后检查工序的自动化。塞规检验如图 3.76 所示,它被设计成一个塞规自动交换和工件偏心补偿机构,塞规自动交换可以实现 M3~M16 各种规格的螺纹的检查。

下面简要地解释一下该系统的机器人动作。

① 塞规低速转动,并以微弱的力压入,与被检查的螺孔入扣,根据塞规的旋入量可以判断塞规的旋入情况。

② 在检测塞规压紧转矩和旋入深度的同时,让塞规转动设定的圈数。

③ 利用通规检查贯通的螺孔。让通规按

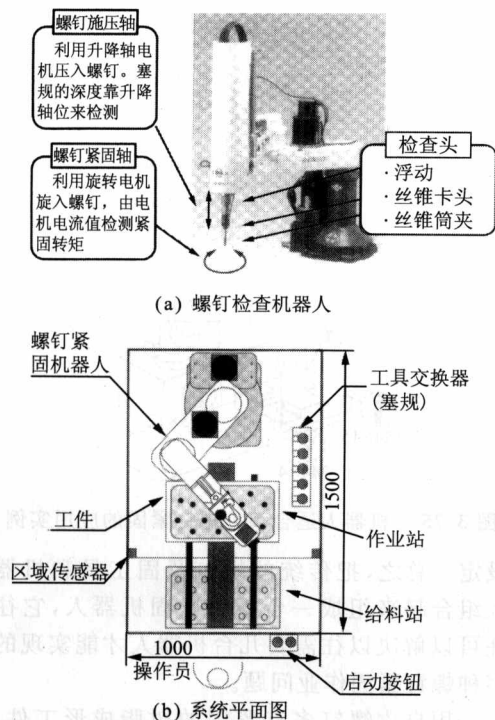


图 3.76 螺纹检查工序的应用事例
(DENSO WAVE)

照设定的角度旋转,当通规到达规定的旋入深度后,其间若未检测到转矩升高(超过许用值),即可判定为合格。

④ 如果通规被堵住,扭矩达到上限值,但是此时已经达到规定的旋入深度,仍然可以判定为合格。

⑤ 利用止规进行检查时,旋入后扭矩升高,若止规深度在两圈以内,则可判定为合格。

本系统可以引入加工零件的螺孔检测工序,这样,依据自动化技术就能全面检查工件,提高生产率,减少装配不良,展示应用的实际业绩。

长田道春

3.5.4 汽车舢装

汽车舢装作业是指白车身(喷涂前的车身)的门、发动机罩等的装配作业,包括涂装工序完成后在白车身上对车门的再装配、坐位、仪表板、备用轮胎的装配等(表 3.6)。

汽车舢装工件的体积大、质量大,作业给工人造成繁重的体力负担,所以应该大力促

进自动化。在解决了多项技术课题后,今天它已经成为一个适合机器人自动化的领域,不过在引入前还需要从生产批量和投资价值方面进行考察。

表 3.6 汽车车身装配、舢装作业的特点

	示 例	特 点	自动化难度
车身装配作业	车门	定位精度高	中度
	发动机罩	工件搬运、固定、螺钉紧固、间隙和凸凹的一致性	
舢装作业	备用轮胎、电池	定位精度低容易抓取	低度
	仪表板、坐席安装	定位精度高、尺寸长、体积大、形状复杂,需要紧固螺钉	中度
	轮胎安装	定位精度低必须对准轮胎刹车盘的位置	中度
	电缆、软管类安装	需要两只手同时作业柔软物、形状不确定物	高度

1. 舢装机器人系统概述

在汽车生产线中,除了上述舢装作业之外,还有一些装配作业也实现了机器人自动化生产。不过在这里只列举车门装配生产线的例子来介绍车门装配机器人系统。

在图 3.77 所示的系统中,装配机器人将车门放置在规定的位置上,螺钉紧固机器人将车门的紧固螺钉拧入车身。该系统中的关键技术是精确抓取车门的手部,以及正确测量车身位置、对车门位置进行正确定位的图像处理装置。

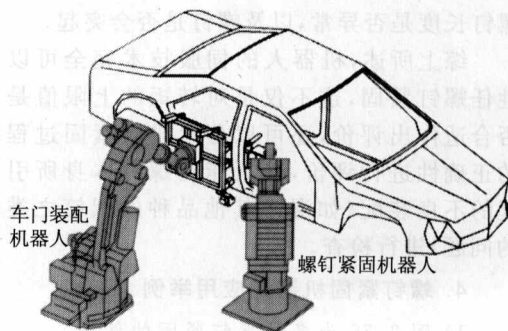


图 3.77 车门装配机器人

1) 车门装配和螺钉紧固机器人

如后面所述,用于汽车舢装和装配的机器人带有抓取车门的手部和螺钉紧固工具,它具有足够的负载能力和足够的承受作业反

力的刚性。这些机器人应该具有以下功能:

① 配备图像处理传感器测量车身位置、工件位置,以便高精度完成装配作业。

② 由车身、工件输送装置,螺钉紧固装置,螺钉供给装置等构成系统,因此它必须具有在多个系统之间进行大量数据交互的网络功能。

2) 车门抓取手部

抓取车门的手部需要具有以下两个功能:

① 抓取不应造成车门平面结构的变形。为了能正确地安装,抓取应该具有很高的定位精度,抓取力应该能经受螺钉紧固机器人紧固螺钉产生的反力,以及适应多种型号汽车的结构要求。

② 配备图像处理装置,用于车门与车身装配位置和紧固位置的修正,其精度应满足所要求的装配精度(图 3.78)。

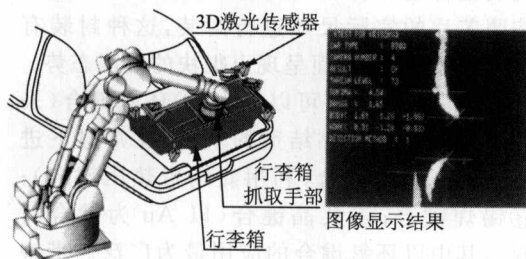


图 3.78 装配用手部和图像处理装置

3) 螺钉紧固手部

螺钉紧固手部应具有以下功能:

① 有足够数量和能满足转矩要求的螺钉、螺母紧固工具。为了能满足不同车型的需要,伺服轴上螺钉、螺母紧固工具的安装节距可以进行更换。

② 有足够数量的检测车门或车身螺钉孔的图像处理装置(必要时)。

4) 图像装置

装配系统的图像处理装置应该具有以下功能:

① 能够检测出车身、车门上的基准孔和螺孔的三维位置。为了利用二维摄像头来完成三维位置测量,使用的方法有用两个摄像头构成立体视觉的方法,或者投射狭缝光束测量孔径,再从几何学关系计算三维坐标的方法等。方法应该根据使用现场的具体条件

加以选择,比如,考察周围环境有无散射光源,工件本身带有的伤痕是否会对识别产生影响等。此外,由于现场的突发事件(碰撞引起的损坏)在所难免,因此装置维护的便利性也是选择的重要标准。

② 向车身上安装车门或行李箱的后盖时,要求安装后间隙一致,而凹凸满足不平度的允许值,这需要测量 4 个位置(图 3.78)。

2. 汽车舢装线

下面介绍汽车舢装线的具体实例。

1) 车门装配线

该生产线系统的任务是操作人员将合页安装在车门上后,由自动装置完成紧固作业,然后由机器人来负责车身上前、后、左、右共 4 扇车门的装配作业(图 3.79)。

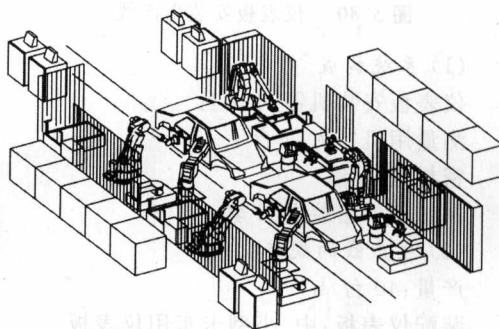


图 3.79 车门装配生产线

(1) 系统组成

车门装配机器人:4 台

螺钉紧固机器人:4 台

螺钉供给装置:4 套

螺母供给装置:2 套

车门供给、定位装置:4 套

车门合页固定装置:4 套

车身输送装置:1 套

(2) 生产线的规格

产量:40 台/h

装配车门:中型轿车门,质量约 15kg,两种车型

定位精度:车门供给精度小于 $\pm 1\text{mm}$

车身停止定位精度小于 $\pm 2\text{mm}$

2) 仪表板安装生产线

该生产线的任务是以测量机器人测取的驾驶室内的位置数据为基准,由机器人将 AGV 运送来的仪表板(汽车车内仪表板)安

装在驾驶室(车身)内。测量机器人还负责完成在仪表板前部涂布防水黏结剂的作业(图 3.80)。

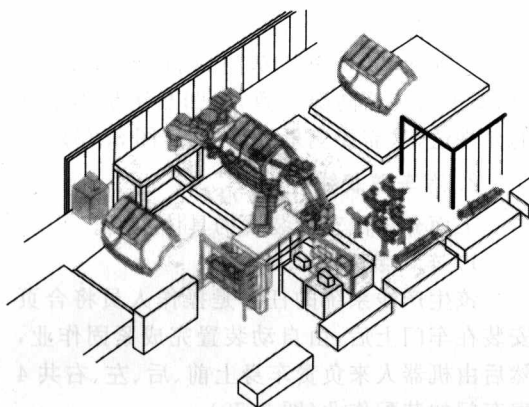


图 3.80 仪表板安装生产线

(1) 系统构成

仪表板安装机器人:1 台

测量用机器人:1 台

密封枪:1 套

黏结剂供给装置:1 套

(2) 生产线的规格

产量:40 台/h

装配仪表板:中、小型卡车用仪表板

定位精度:仪表板供给精度小于 $\pm 1\text{mm}$

车身停止定位精度小于 $\pm 5\text{mm}$

加纳雄三

3.5.5 键合

半导体元器件的加工过程有前工序和后工序之分。前工序负责直至在晶片上完成电路图形的任务为止,后工序负责此后的封装任务。键合属于后工序,它分为两类:一类叫做芯片键合,是指从晶片切成芯片后放入组件进行键合;另一类叫做引线键合,是指用金属细丝将电极焊点与组件引脚连接起来。可见这里所说的键合工序有别于配双二极管封装后的装配。图 3.81 所示为典型的半导体元器件制造工序。

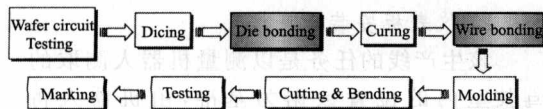


图 3.81 半导体元器件的制造工序

随着功能和集成度的不断发展,芯片厚度越来越薄,电极焊点越来越小,间距越来越短,要求半导体键合装置不仅具有高速、高精度和高可靠性,而且还要满足作业的高稳定性的要求。到 2000 年初,半导体制造工艺正在向芯片厚度小于 $100\mu\text{m}$,电极间距为 $35\mu\text{m}$ 的数量级发展。在直接连接芯片电极和引脚的倒装片工艺中,键合的精度要求为 $3\mu\text{m}$ 。

1. 芯片键合

1) 工艺

所谓芯片键合就是从晶片中挑选芯片,通过黏结剂与组件(电路板、引线框、TAB 带)等连接的过程。按照封装形式可以分为芯片表面(电路面)朝上的正面键合方式和将芯片翻转 180° ,让电极焊点与电路板一侧电路图形直接键合的背面键合方式。由于在后一种方式中芯片被倒放,故也称其为倒装键合。倒装键合能节省引线键合工序(见后所述),按照芯片的实际尺寸进行封装,这种封装有利于高频特性,因而呈现出很快的发展态势。

正面键合工艺可以分为:①环氧键合(采用环氧树脂作为黏结剂的基材,在常温下进行键合);②带键合(利用黏结带热压键合);③锡焊键合;④共晶键合(以 Au 为键合材料),其中以环氧键合的应用最为广泛。带键合适合芯片叠层式,锡焊键合和 Au 共晶键合适合分立元器件(晶体管之类)的键合。

背面键合的工艺可以分为:①锡焊键合;②异向导电胶(ACP: Anisotropic Conductive Paste)和非导电胶(NCP: Non Conductive Paste)等基于树脂胶的压力键合;③同向导电薄膜(ACF: Anisotropic Conductive Film)和非导电薄膜(NCF: Non Conductive Film)等基于树脂薄膜的压力键合;④基于 Au-Sn 的共晶键合。与锡焊键合相比,树脂压力键合的优点是能够省略锡焊后续工序中的溶剂清洗和树脂密封工序,因此近年来它已经形成普及的趋势。

2) 设备(芯片键合机)

对芯片键合机的要求是黏结剂涂布稳定、键合位置定位精度高、生产效率高等。近年来所要求的设备性能规格如表 3.7 所示。在键合机中,组件输送、晶片输送、芯片检测、黏结剂涂布、芯片拾取和键合等一系列动作

都是并行的,因此它的硬件结构和软件都必须按照高速运行的要求进行设计。

表 3.7 环氧芯片键合机的性能规格

芯片尺寸/mm	0.2~3	3~25
键合速度/(s/die)	0.17~	0.45
定位精度 $X, Y/\mu\text{m}$	± 50	± 20
$\theta/(^{\circ})$	± 2	± 0.5

键合时有两处用到高精度的位置检测:一处是晶片上的芯片位置检测;另一处是组件输送到位后对键合位置的检测。晶片上排列的一枚枚芯片的位置由安装在晶片正上方的摄像头通过图像处理取得,然后通过识别装置读出位置(X, Y, θ),再根据偏移量信息($\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta$)反馈到晶片承载台的(X, Y, θ)轴加以修正。类似地,组件位置检测也利用对键合机座的反馈实现(X, Y)位置修正,从而正确地实现芯片的拾取和键合。

图 3.82 所示为芯片键合机的系统构成(平面图)。芯片键合机的输送系统由组件(电路板、引线框、TAB 胶带等)输送子系统(工件保持器)和晶片输送子系统构成。组件输送子系统又分为两种:一种是凸轮-销输送方式,用于特定零件的大批量生产;另一种是数字节距输送方式,适合多品种小批量生产,用手爪可抓取任意数量的零件。该子系统还包括其他组成部分,如涂布黏结剂的涂布部分、键合头,从晶片拾取芯片的芯片顶起装置,检测芯片位置,组件位置的图像识别系统(光学系统和识别装置)等。

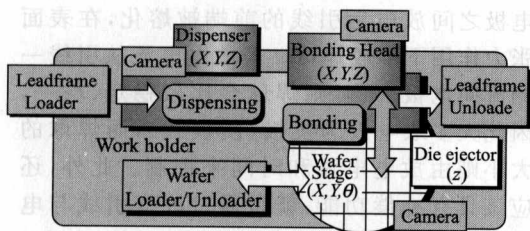


图 3.82 芯片键合机的构成图

3) 关键技术

(1) 涂布(黏结剂分配) 黏结剂通常用环氧树脂胶,它分为非导电性胶和导电性胶两种。除根据产品的形式之外,还应根据热传导特性、黏结胶与组件黏结部分材料的黏结性等对热膨胀系数的影响分别使用。

涂布的方法分为简单喷射方式(每次喷

射都对芯片焊点实施涂布)和扫描方式(按照芯片形状采取最优模式涂布)两种。简单涂布方式包括单喷嘴型和多喷嘴型(喷淋嘴型),适合单喷嘴型的芯片属于小尺寸(不大于 $\square 2\text{mm}$),适合喷淋嘴型的芯片尺寸大于 $\square 2\text{mm}$ 。单喷嘴型的优点是速度快,而喷淋嘴型如果遇到多品种小批量生产线,需要根据品种更换喷嘴,很费时间。扫描方式在更换产品种类时无需更换喷嘴,由于它能够根据芯片的形状采取最佳的模式涂布,故其芯片胶量溢出最小(不超过 $10\mu\text{m}$),并能达到 100% 的浸润性。

涂布部分的机械结构一般由 XY 滑台和其上搭载的 Z 轴驱动部分组成。充满黏结剂的作动筒随 Z 轴的升降而运动。通常, Z 轴由凸轮驱动, XY 轴由步进电机或伺服电机驱动控制。黏结剂的排出大多采用压缩空气,对时间和压力均实施控制,为了能让黏结剂稳定地排出,可以直接控制排出胶的体积。

(2) 芯片拾取 从晶片上拾取芯片的方法是利用拾取头上的真空吸嘴吸附,同时配合细针从背面顶起芯片,将它从晶片张贴的薄膜上剥离下来。拾取动作需要按照芯片的质量、顶起量、时间进行控制。为了避免在作业中损伤芯片,顶起量应该按照不同芯片有所改变,芯片的位置也会随之升降。同时,为了保证拾取芯片的载荷不变,需要采用特殊的设计,如采用 VCM (Voice Coil Motor) 加压机机构,或者让顶起动作单独驱动等。

稳定地拾取厚度小于 $50\mu\text{m}$ 的 PTP (Paper Thin Package) 芯片往往并不容易,有待于开发新的技术以替代传统技术。

(3) 图像识别 (PRS: Pattern Recognition System) 多值化图像处理系统进行图像识别的目的在于获得晶片上芯片的具体位置、不良印迹、伤痕等信息。经过多值化图像处理,采集的图像被识别成 256 级灰度,能显示出图形在对比度方面的细小差别。具体检测方法有图形检测向量相关法、芯片边缘检测法等,应该根据产品的形式、精度、用途等选择最适合的方式。例如,倒装芯片键合,翻转前从晶片拾取芯片的动作要求可以粗糙一些,而翻转后则需要进行高精度的图形匹配检测,因为此时芯片的电极焊点将直接与组件的接线图形连接。

2. 引线键合

1) 工 艺

引线键合就是利用 Au 等材料的金属细线($\phi 18\mu\text{m} \sim \phi 70\mu\text{m}$)将完成芯片键合工艺的芯片电极焊点和组件引脚图形一一连接起来的工艺。这道工序的最大优点在于可以利用图像识别装置分别检测出电极焊点与引脚图形的位置,实现补偿。这样即使原材料本身的精度不高,或者前一道工序的精度较差,也不会给键合造成障碍。该工艺要求生产设备键合的速度非常高。速度的记录每年都在刷新,到 2000 年已经达到每根引线键合仅仅需要大约 0.07s(引线长度=2mm)。表 3.8 给出目前最先进的引线键合机的性能规格。

表 3.8 引线键合机的性能规格

电极焊点间距/ μm	35
键合速度/(s/wire)	0.07
位置精度/ μm	± 3.5

引线键合的形态有两种:一种是与电极焊点连接的引线端部放电,形成球形焊点,即所谓的球形键合;另一种是采用 Al 引线,在常温下通过超声波振动和加压实现结合,即所谓的楔形键合(楔焊)。球形键合常使用的引线材料有 Au、Cu 细丝等,同时采用叫做劈刀(capillary)的键合工具(一种圆柱状无方向性的键合工具)。现在,劈刀工具的应用十分普及,其优点是能在任何连接线方向上高速形成点或焊球,而且对电极焊点的伤害很小。相比之下,楔形键合采用有方向性的特殊形状键合工具,这样就需要借助于一个旋转机构使引线方向与键合工具的方向取得相对一致。旋转方式具体有位于引线一侧的和位于载物台一侧的两种,问题是生产效率相对较低。不过此时的键合属于 Al 电极焊点等同种金属之间的键合,因此凸显出可靠性高的优点。

2) 设备(引线键合机)

(1) 机构和动作 该机构包括输送和夹持组件的工件保持器、驱动 Z 轴的键合头、搭载键合头的 XY 平台、检测键合位置的图像识别部分、控制整个系统的控制器、负责材料供给和输出的装载/卸载部分等。键合头配备有放电电极(形成焊球)、超声波探头(传输和施加键合所需要的超声波振动)等。图 3.83

为键合头的示意图。

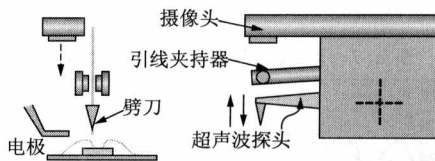


图 3.83 键合头的示意图

Z 轴通过超声波探头和引线夹持器的圆弧运动实现快速升降。用于对象物识别的摄像头等光学系统和放电电极固定在键合头上。Z 轴前端的动作如图 3.84 所示。焊球形成后,为了降低因高速下降和碰撞引起的冲击,在形成焊点后运动立即切换成低速。焊点键合完毕后,XY 轴按环形路径进行联动。引线键合后,Z 轴上升,留出下一个焊球所需的引线长度的备份,然后引线夹持器再度夹持引线一起上升,最后切断引线(详细情况请参见图 3.86)。

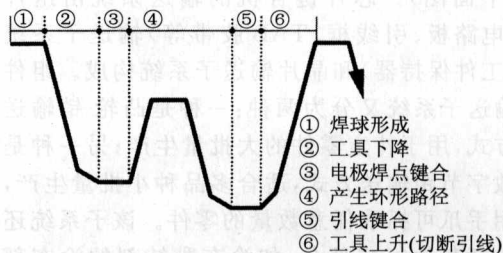


图 3.84 Z 轴前端工具的位移曲线

(2) 关键技术

① 焊球成形。从劈刀伸出的引线与放电电极之间放电后引线的前端被熔化,在表面张力作用下形成焊球。若放电电流从引线一侧流向电极一侧,则焊球会比较稳定、均一,因此大多取电极为负极(阴极式),而焊球的大小则由放电电流和时间来控制。此外,还应该具有补偿功能,就是通过改变引线 with 电极之间的放电间隙来稳定焊球尺寸。例如,焊点间距为 $35\mu\text{m}$ 时,小球的大小通常应该为 $\phi 23\mu\text{m}$ 左右。为了达到稳定成形,电极材料一般采用电化学腐蚀性较优良的 W 合金和 Pt 合金。

② 键合性。引线和电极焊点/引脚端子的键合采用超声波振动+加热+加压的键合方式,即由压力、热、超声波振动三个方面的结合。电极焊点通常采用 Al 或 Al 合金薄膜

成形,与 Au 或 Cu 引线材料之间属于不同金属的键合。这种键合可以被看成是焊球(引线)受压力和超声波振动的作用,在变形的过程中接触面的氧化膜被破坏形成新表面,进而 Al 和 Au 相互扩散形成合金层。现在已经掌握,合金层的面积与键合强度成正比。为了能在焊点间距缩小的条件下提高小焊球键合的键合强度,可以将超声波的共振频率由过去的 60kHz 提高到 120kHz。式(3.1)表明,一般来说,频率升高振动能量增大,能量的增大又使焊球的键合强度得到提高,键合时间得以缩短,这对于只能在 100℃左右的低温下进行键合的材料是提高键合强度非常有效的措施。

$$\begin{aligned} \text{振动能量 } U &= \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (a\omega)^2 \\ &= \frac{1}{2} m a^2 (2\pi f)^2 \\ &= 2ma^2\pi^2 f^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

式中, m 为质量; v 为振动速度; a 为振幅; ω 为角速度; f 为频率。

③ 环形成形。由于封装形式是多种多样的,因此对引线环形的形状要求也是不同的,例如,短的、长的、低的、梯形的等,图 3.85 给出引线环形的照片。通常需要 X 轴、Y 轴、Z 轴这 3 个轴进行同步伺服驱动,才能获得高速且稳定的环形形状。为此,基本的要求是无论键合方向如何,都应该形成相同的轨迹,即使环形的长度不同,也应该能满足相似轨迹的要求。产生稳定形状的另外一点要求是对环形动作做到精确控制,能够主动地在引线的任意位置打卷,降低高度和直线度方面的分散性。为了形成高度大约为 100 μm 的低位置环形,需要降低弯曲引线的高度,但事实上放电会在焊球上部造成热影响区,该区内的 Au 发生再结晶和晶粒粗大化,导致硬化,加大了低环形成的困难,因此人们都在积极地推进减小热影响区的放电条件的研究,或者开发热影响区小的材料。在结构设计方面,人们的努力目标在于谋求 XY 平台的高速和高刚性,让键合头在驱动力矩作用下不会产生变形。为了实现高速化,必须在材料和结构分析的基础上减小驱动部分的惯量。因为在小球形键合(键合后的焊球直径小于 30 μm)的场合,焊球与焊点接触时几乎没有吸

收冲击的变形裕量。

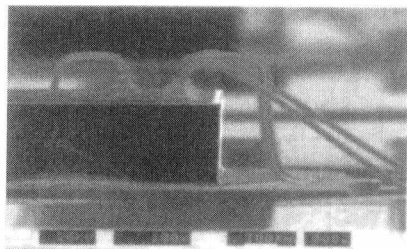


图 3.85 三角形和短梯形的环状引线照片(芝浦机电)

④ 图像识别(PRS: Pattern Recognition System)。芯片键合时,芯片表面电极焊点的位置、引线框、电路板、TAB 胶带等与组件相关的键合位置检测采用多值化图像识别装置。图像按照最大 256 级灰度识别进行图形匹配。引线键合时所需的检测项目包括电极焊点位置、组件的键合位置等。对象器件不同,检测的方法也各异。对三极管、LED 等小引脚器件,由于组件一侧的键合空间足够大,在多数情况下只需要检测芯片电极的位置即可。对于 LSI 等多引脚器件(引脚多于 100 个),就需要检测电极位置和引脚一侧的全部引脚(引脚定位)位置。通常,先检测组件的基准点和芯片的两个对角点位置,再识别芯片相对于组件的位置 X 、 Y 、 θ ,并进行补偿,然后检测引脚,确定键合的位置。在进行引线定位时,一般让摄像头在视野范围内拍摄多个引脚成组进行处理,而检测引脚则改成小放大倍数摄像头,通过两者组合使用可以提高图像识别的速度(图 3.86)。

3. 在生产中的应用

半导体元器件生产厂都是 24h 连续运转的,所以在选择设备时,除了要求运动部件寿命长、免维护、操作简便之外,必须考虑 COO (Cost Of Ownership, 拥有成本),这是引入设备的指标,有利于低价格设计的开展。

下面以晶体管、LED 等大批量少品种生产的分立元器件为例,说明建立芯片键合、引线键合、制版、检验、标记等加工生产线的方法。各个工序的设备台数应该按照与生产能力匹配的原则进行连接。设计的原则是当某些设备因故障停止时,其他设备仍然可以独立运行。

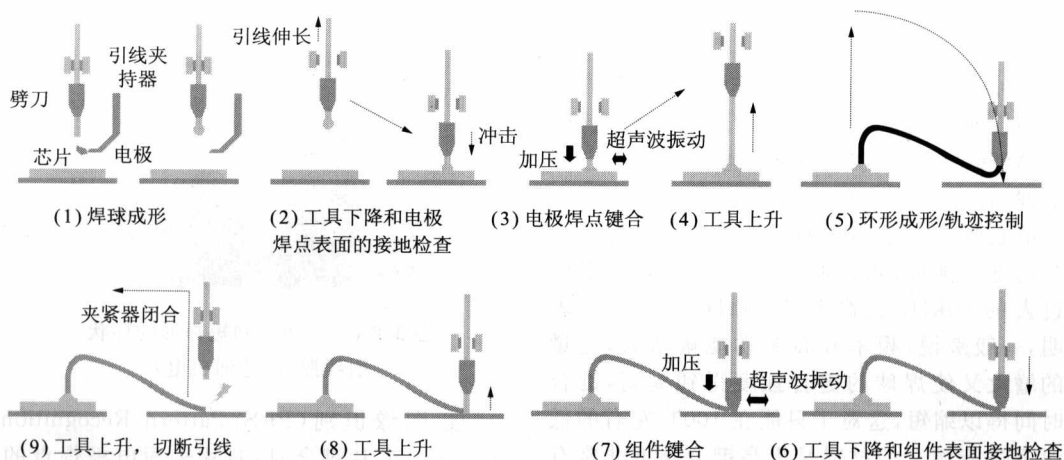


图 3.86 键合的步骤

为了能够自动运行和提高产品质量,人们还致力于开发智能化生产系统,它具有自诊断、异常值实时监视、次品原因分析和处置等功能。

4. 封装工艺的发展趋向和设备开发

可以预计,随着集成度和容量的进一步发展,芯片厚度将降至 $50\mu\text{m}$ 以下(以 PTP 为代表),2 层或 3 层的叠层结构也将不断增加。这对于芯片键合机来说就产生了应对不同厚度芯片的选取技术和重叠(堆积)技术。对于引线键合机来说,则面临焊点间距达到 $25\mu\text{m}$ 左右时极细焊球的成形、减小 Au 焊球对焊点的冲击、小焊球的键合 $\phi 18\mu\text{m}$ 以下的极细引线的环状成形等技术。对于倒装芯片键合机器人来说,除了满足键合工艺多样化和高速、高精度的要求外,同时还要求装置具有应对多种工艺的柔性。总之,一个方向是延长传统技术的寿命;另一个方向是不断开发新技术。

植村 哲

3.6 洁净间

1. 无尘作业

在半导体工厂或 FPD(平板显示器)工厂中,需要在洁净间处理的制造工序非常多,其他领域如制药、生物工程等,对洁净间作业的需求也增长得很快^[1]。在无尘埃环境下的制造工序中,人成了产生尘埃的污染源,因此洁净机器人发挥着重要的作用。

下面以图 3.87 所示的半导体制造工序为例概要地说明无尘作业^[2,3]。洁净机器人主要用于在制造设备内部或相邻制造设备之间搬运晶片和在各个制造工序之间传送晶片。

1) 晶片制造工序

这个工序是指先以硅石为原料将其精炼成高纯度多晶硅,再制成单晶硅的过程。最普通的单晶硅制造方法是切克劳斯基法(提拉法),即用坩埚将硅加热至熔融状态,投入

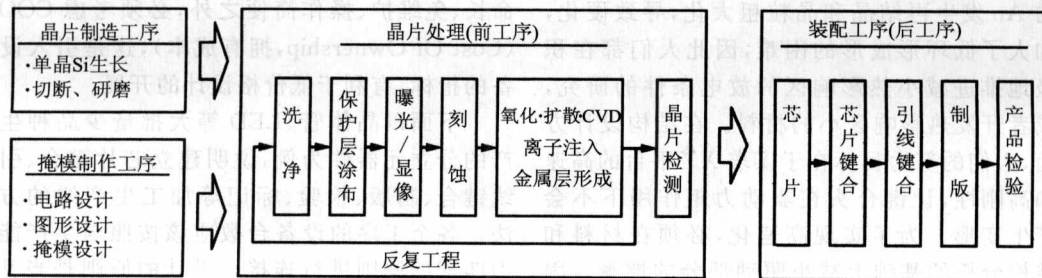


图 3.87 半导体制造工序

晶种,然后边旋转边慢慢向上提起,让单晶硅生长。得到的优质圆柱状单晶硅(硅锭)经过外圆磨削→切断(薄片)→研磨等工序后即得到镜面晶片。为了提高半导体的生产效率,晶片直径有越来越大的趋势,到2000年,其直径可达300mm。

2) 掩模加工工序

掩模加工工序是指在IC设计和制造中对晶片处理工序来说必不可少的光掩模制作工序。在根据IC功能的要求完成电路设计后,一旦确定了构成元器件的具体布局图形,就需要制作很多块适合晶片处理工序的光掩模。光掩模是利用图刻蚀法在石英玻璃平板上形成氧化铬遮光膜制成的。

3) 晶片处理工序(前工序)

它包括反复进行的刻蚀处理(从光掩模向硅晶片上复制图形)、氧化膜形成、杂质扩散、金属布线层形成等操作的工序。上述处理过程涉及的半导体制造设备包括清洗装置、图刻蚀装置(保护层涂布、曝光、显像、刻蚀)、激活装置(热扩散、离子注入)、薄膜形成装置(真空镀膜、喷溅、CVD)、热处理装置(氧化、退火)等。

在晶片处理工序中,需要高真空环境的工艺过程很多,真空度达 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ Pa,因此要求安装在处理设备中的担任晶片搬运作业的机器人具有很高的耐真空性能。

4) 装配工序(后工序)

装配工序是指从晶片上形成IC芯片到制成IC分立元器件的装配工序,它包括从晶片上切取IC芯片(小片),安装引线框(芯片键合),IC芯片与引线框之间的电极引线进行连接(引线键合),热硬化树脂模压成形和引脚加工,IC封装表面标记,最终的产品检验等一系列作业。

2. 洁净间的洁净度

洁净间的洁净度由给定空气容积中所含浮游微粒子的大小和数量来进行衡量。美国联邦标准(FS209E)用单位立方英尺体积中所含微粒子数来表示,日本工业标准JIS规范(JIS B 9920)用 1m^3 体积中微粒子数的10的幂指数来表示。一般在洁净机器人的产品目录中都采用“1级($0.1\mu\text{m}/\text{cft}$)”之类的美国联邦标准进行表示。

在半导体制造过程中,晶片处理工序使用1级($0.1\mu\text{m}/\text{cft}$)~10级($0.3\mu\text{m}/\text{cft}$),装配工序使用10级($0.3\mu\text{m}/\text{cft}$)~1000级($0.5\mu\text{m}/\text{cft}$)的洁净机器人。

3.6.1 晶片操作

1. 晶片处理工序的输送系统

半导体制造设备大致可以按照两种方式进行布局:一种是流水方式,依据处理工序的先后顺序排列制造设备;另一种是作业安排方式,把相同类别的制造设备集中布置。在重要的、基于洁净机器人进行晶片输送作业的处理工序中,通常都采用后者。在图3.88中,晶片处理装置正对洁净间内的作业区,而管道和配线隔着墙壁布置在服务区内。这种设备布局类似于港湾,因此称其为港湾(或工段)式系统。

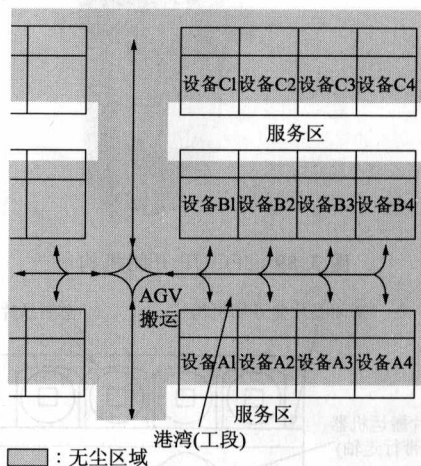


图 3.88 晶片处理工序的设备布置

在晶片处理设备中,各种处理都在叫做chamber的容器中进行。早期阶段晶片的尺寸较小,多采取批处理方式(大量晶片一同进行处理),现在晶片尺寸增大许多,单个晶片处理的方式已经成为主流。为了缓解各个设备之间搬运时间不同所造成的问题,往往将多枚晶片暂存在晶片盒里进行运送。处于待机状态的晶片盒被存放在叫做储藏柜的保管装置中,等待由AGV运送到港湾内的各种处理装置中去。

半导体集成度提高后,对晶片处理设备的处理空间提出了极高的洁净度要求(例如,1级($0.1\mu\text{m}/\text{cft}$)洁净度)。维持整个洁净间

均处于1级洁净度所花费的成本通常很高,因此今后的主流趋势将是微环境方式,即只维持局部区域内的高洁净度环境。这样,各个设备之间的晶片盒就从传统的开放型晶片盒向密闭型晶片盒((FOUP: Front Opening Unified Pod, SMIF: Standard Mechanical Interface)舱)转变。相应于密闭晶片盒,半导体制造设备都带有如图3.89所示的晶片盒开闭机构。晶片盒置于开闭机构的加载口处,盒盖就自动开启,位于设备内部的单片式晶片搬运机器人就将晶片从晶片盒内搬运到处理chamber中(图3.90)。

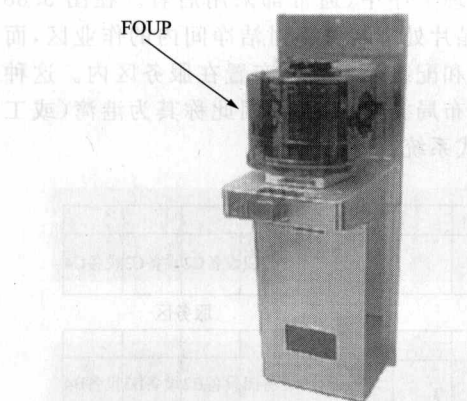


图 3.89 FOUP 开闭机构

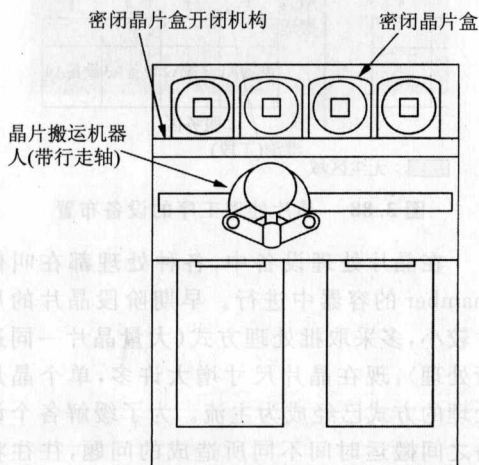


图 3.90 晶片的加载与卸载机构

2. 晶片搬运机器人

典型的晶片搬运机器人的机械结构和外观如表3.9和表3.10所示。完成晶片加载、卸载作业的单片式晶片搬运机器人的基本动作包括手臂的伸缩、旋转和升降。因此,机器

人的机械结构采用标准的3轴圆柱坐标结构。从作业特征分析,晶片搬运机器人手臂的形状应该呈扁平状,其最小旋转半径尽量小。手臂伸缩机构有移动机构、连杆机构、多级连杆机构、闭链机构等。连杆机构的优点是能够保持末端姿态始终与手臂伸缩方向一致。

表 3.9 晶片搬运机器人的机械结构^[7]

机械结构	极坐标型	圆柱坐标型	水平多关节型	闭链型
轴数	2轴	3轴	4轴	3轴
外观图				

表 3.10 其他晶片搬运机器人^[7]

项目	双臂	多级连杆机构手臂	真空机器人	晶片盒搬运机器人
外观图				

(Brooks Automation, Genmark Automation, GL, 神钢电机, 大阪变压器, 平田机工, 三菱重工)

半导体制造设备的晶片盒站通常有2~4个晶片盒。这样,对于3轴圆柱坐标型晶片搬运机器人来说,晶片盒就应该以机器人为中心成放射状布置。如果按照直线的形式布置晶片盒,那就必须再增加一个行走轴。4轴水平多关节晶片搬运机器人在水平面内能够控制末端姿态,因此它无需行走轴,允许晶片盒按平行(或直角)方式进行布置。

3. 洁净机器人的技术课题^[4]

(1) 密闭结构 可动部分的防尘问题可以采用磁流体密封、硅密封、迷宫密封、聚氨酯橡胶褶皱保护罩等进行解决。

(2) 抽吸排出 将机器人内部的空气排出,产生负压环境,以防机器人内部的粉尘溢出。

(3) 表面处理 为防止结构件表面产生粉尘,通常采用烤漆喷涂、电极沉积喷涂、静电喷涂、无喷涂硬化防腐铝处理等方法。

(4) 防止静电 为了防止在干燥空气中运动的机器人带静电,通常采取的措施是在末端执行器附近的某个位置添加接地线或导电材料。

(5) 外部形状 为了避免搅乱洁净间内的气流状态,减少尘埃的堆积,气路管道和电缆一概应该收入机器人内部。

4. 真空机器人的技术课题^[4]

(1) 真空维持 真空环境是与大气隔离的密闭空间,一般是利用真空泵排出产生的气体来维持真空。

(2) 防止气体产生 为了防止产生气体,机器人结构件均应采用非铸造的切削加工零件。

(3) 真空密封 大气与真空界面可以采用 O 形圈或密封垫等进行密封,而可动部件则应该采用多级磁流体密封或不锈钢无尘波纹管密封。

(4) 润滑 真空环境下的润滑通常采用氟真空润滑脂或固体润滑剂,如软金属(Au、Ag)、层状结构材料(MoS_2)等,它们产生的气体很少。

(5) 散热 在真空环境中靠大气对流是无法散热的,往往需要利用结构件的热传导进行散热或水冷散热。

3.6.2 LCD 搬运

1. LCD 的制造工序^[5]

图 3.91 为有源矩阵驱动方式(TFT 方式)LCD 的截面图。LCD 由两块玻璃平板构成,其中一块是 TFT 阵列,另一块是滤色片。制造工序如图 3.92 所示,包括上述两块玻璃平板的制造工序和驱动器的装配工序。

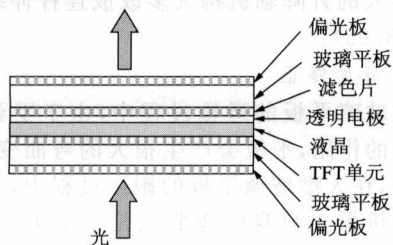


图 3.91 TFT 方式 LCD 的截面结构

(1) 阵列设计/掩模制造工序 指电路设计和布置的设计,以及用于图形复制的掩模制造工序。

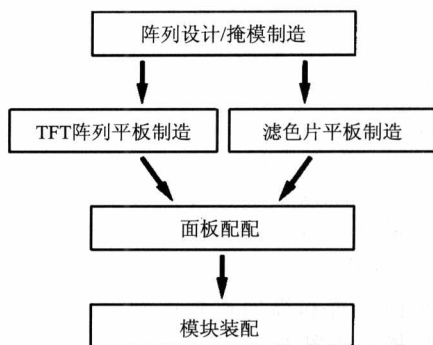


图 3.92 LCD 的制造工序

(2) TFT 阵列平板制造工序 指在玻璃平板上形成 TFT 单元的工序。图刻蚀方法基本上与晶片处理工序的方法类似。

(3) 滤色片平板制造工序 指在玻璃平板上形成与像素色点排列对应的滤色片的工序。该工序形成像素间的黑色矩阵、着色图形、保护膜、透明电极等。

(4) 面板装配工序 指将两块玻璃平板贴合在一起,并按显示器尺寸切断、完成液晶注入和封装的工序。一旦面板表面再贴上偏光板,则液晶面板的制作即告完成。

(5) 模块装配工序 指在液晶面板上安装背景灯、电路元器件等形成液晶模块的装配工序。

2. 玻璃平板制造中的搬运系统

在 LCD 制造中,由洁净机器人完成的主要作业包括将玻璃平板向工艺设备的加载/卸载作业、设备/工序之间的转运作业等。与半导体制造工序相类似,向工艺设备运送玻璃平板的工作也靠单片式搬运机器人来完成,设备/工序之间的转运也采用晶片盒。图 3.93 示出了玻璃平板制造设备的平面布置示意图。

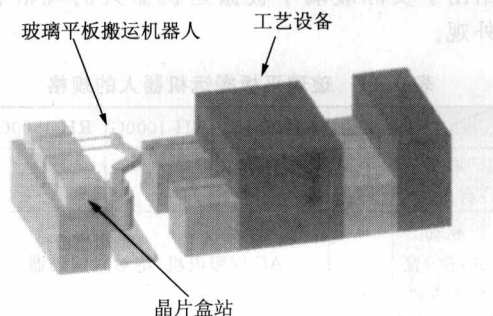


图 3.93 玻璃平板制造工序的设备平面布置

随着 FPD 画面尺寸的增大和生产效率的提高,玻璃平板不断向大尺寸发展,已经出现第 4 代(680mm×880mm,730mm×920mm)、第 5 代(1000mm×1200mm,1100mm×1250mm)、第 6 代(1500mm×1800mm)等。在显示器产品减轻质量呼声的推动下,平板厚度又不断向更薄的方向发展,目前已经达到 0.7mm 甚至更薄。至于保管晶片盒的形式有横向放置和纵向放置两种,目前的工艺设备以横向放置为主。

搬运玻璃平板的基本动作类似于搬运晶片,可以用 3 轴圆柱坐标系。不过,搬运大型平板大多采用如图 3.94 所示的多关节型搬运机器人,它增设了一个手部自由度。设计机器人的工作空间时,伸缩行程必须超过平板长边的 2 倍以上,升降行程与晶片盒的高度相比也必须足够大。因此,容纳 20 张大平板的晶片盒,其高度将超过 700mm。有些工艺设备在高度方向上还有玻璃平板装入口,其升降动作的范围甚至超过 1000mm。

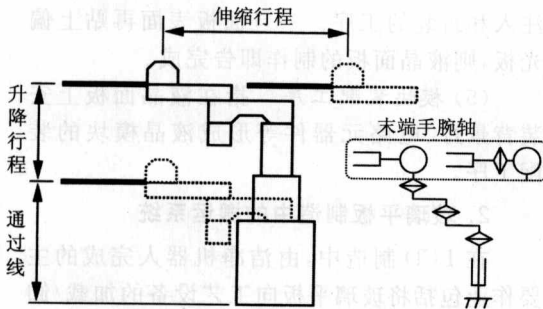


图 3.94 玻璃平板搬运机器人的结构

3. 玻璃平板搬运机器人的技术课题

下面我们来总结一下玻璃平板搬运机器人特有的技术课题。表 3.11 和图 3.95 分别给出了实际玻璃平板搬运机器人的规格和外观。

表 3.11 玻璃平板搬运机器人的规格

	单位	RH-E5HC	RH-1000G	RH-1500G
动作自由度	轴数	4	4,5	5,6
驱动方式/位置检测方式		AC 伺服电机/绝对式编码器		

续表 3.11

		单位	RH-E5HC	RH-1000G	RH-1500G
伸 缩	行程	mm	1130,1285 (偏距 200)	1752 (偏距 450)	2262 (偏距 500)
	速度	mm/s	800	1800	1100
升 降	行程	mm	235~500	755,1200	1200
	速度	mm/s	200	600,700	700
通过线		mm	550~935	885	873,895, 1120
最大负载重量(含手部)		kg	5	15	40
重复位置精度		mm	±0.06	±0.1	±0.5
搬运平板尺寸		mm	550×650	1100×1100	1200×1500
洁净度(尘埃抽取)			10 级(0.3μm)		

1) 升降机构

与半导体制造类似,在 LCD 制造中降低洁净间成本也是一个重要的课题。通过线(工件搬运面高度)是指可维持洁净度的范围,应该尽量将其设置得低一些(800~1200mm)。对于搬运机器人来说,它的升降机构应该能够在低的通过线到晶片盒最上端之间做高速运动。

基于占地面积的考虑,传统洁净机器人的升降轴都设计成直线伸缩机构。但是为了兼顾低通过线和大升降行程这两个方面的要求,升降轴可以设计成多级伸缩,不过其结果是机构会很复杂。鉴于此,大型玻璃平板搬运机器人的升降轴机构大多改成连杆伸缩机构(图 3.95)。

2) 弯曲修正

在玻璃平板的运输过程中,由于受到自身重力的作用,平板会产生很大的弯曲变形。实际上,在大型玻璃平板的搬运过程中,手部或搬运机器人自身的弯曲也是一个大问题。其结果是收容晶片盒中容纳玻璃平板的层高不得不设计成 30~40mm 的间隙,即使如此,单凭 3 轴圆柱坐标机器人操作平板的出入仍

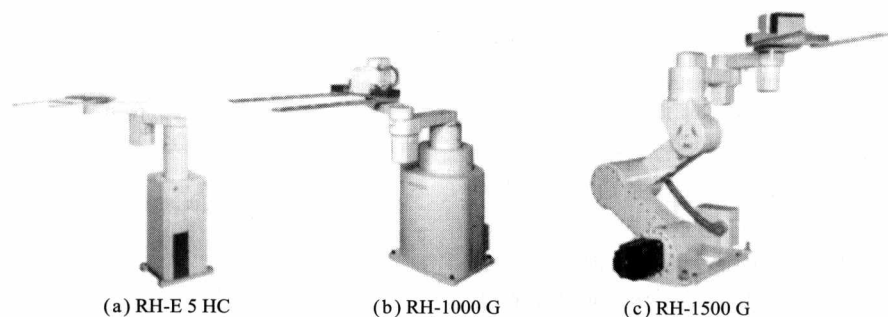


图 3.95 玻璃平板搬运机器人(三菱电机)

然显得比较困难。因此,通常人们往往在手部末端设置弯曲修正驱动轴(动作范围为 $\pm 5^\circ$)。如果再增加一个手部扭转驱动轴,那么平板在搬运时就能采取多种姿态,如翻转或倾斜等。

3) 节省空间设计

玻璃平板尺寸变大,搬运机器人的尺寸不可避免地也要相应加大,于是如何减少搬运机器人在洁净间中占用的空间就成为一个非常重要的课题,设计时应该尽量压缩机器人的最小旋转半径。最小旋转半径因平板尺寸和旋转姿态的不同而异,对于第4代和第5代玻璃平板来说,该尺寸通常分别为700~900mm,1000~1200mm。

4) 手部结构

在玻璃平板搬运作业中,通常采用铝或CFRP制的扁平叉形手。如图3.96所示,玻璃平板的弯曲形状随手部对平板支撑间距的不同而发生显著的变化。实际上,为了能把支撑接触点布置到玻璃平板的背面,大多采用真空吸附方式来夹持平板。

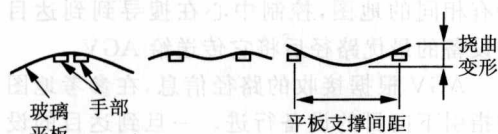


图 3.96 支撑间距与玻璃平板挠曲形状的关系

3.6.3 洁净间无人搬运车(AGV)

1. 半导体制造车间

从计算机、移动电话到家用电器,我们的身边充满了半导体产品。半导体制造对当今社会来说是不可或缺的。

为了能稳定、快速地提供廉价的半导体

产品,显然降低成本、提高原材料利用率、改善生产线的运行率都是极为重要的课题。

为了进行细微的处理和加工,半导体制造必须保持车间内空气的洁净度,需要建造高洁净度的车间(下面称为洁净间)。为了维护洁净间的洁净度,又应该尽可能地排除空气污染源。

污染源多种多样,在车间内从事劳动的工人本身也是一种污染源。

在传统的半导体制造过程中,一度由人工负责将半导体制品材料——硅晶片(wafer)从一台设备转运到另一台设备,这样的晶片处理设备多达数百台,可见搬运作业本身就属于重体力劳动,而操作的错误(材料投放错误等)在所难免。举一个实际搬运作业的例子,容纳25片规格的晶片盒转送200mm晶片,其质量为3kg左右。

到2000年,搬运300mm晶片的主流形式都改成暂存于所谓的FOUP(Front Opening Unified Pod,前开式晶圆盒)容器内来实施了,质量达到了10kg,显然继续采用人工进行搬运已经无以为继了。图3.97给出晶片盒和FOUP(它统称为托盘(carrier))的外观。

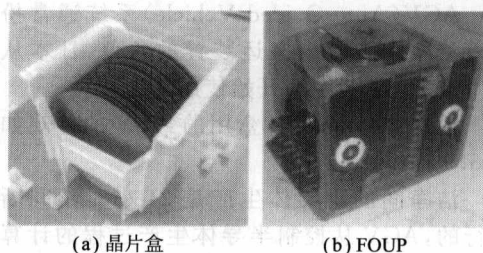


图 3.97 托盘的外观

综上所述,为了保持半导体制造车间内的洁净度,应该向半导体搬运中引入自动化

作业,这样既能减少操作员对洁净间带来的污染,同时还能减轻工人的劳动强度,减少操作失误。

图 3.98 为洁净间的外观。在洁净间中,总是将完成同类工序(曝光、刻蚀、离子注入、清洗等)的所有设备集中在一条通道上,这种通道达数十条之多,它们垂直排列在中央通路的两侧。人们将排列着同类处理设备的通道称为工段内(intra bay),而中央通路则称为工段间(inter bay)。

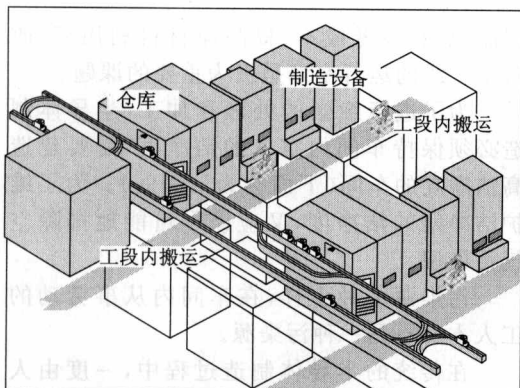


图 3.98 洁净间的外观

工段内的一端设有仓库(stocker,半导体工厂内的自动仓库),起到转送缓冲器的作用,以便于调整工段间的处理时间。

工段间的搬运设备采用直线电机驱动的、在顶棚上绕行的 OHS(OverHead Shuttle)。

根据现场情况,工段内搬运设备可以选择 AGV(Automated Guided Vehicle)、OHT(Overhead Hoist Transport,带提升机的高架搬运装置)、RGV(Rail Guided Vehicle,有轨搬运车)等。

2. AGV 系统

AGV(Auto-Guided Vehicle)系统通常扮演着洁净间工段内搬运装置的角色,日本从 20 世纪 80 年代中期开始使用它。

输送 200mm 晶片盒用的 AGV 的外观如图 3.99 所示。

洁净间的半导体生产是 24 小时不间断进行的,AGV 从控制半导体生产过程的计算机(主计算机)接受命令,将仓库内的晶片移到晶片处理设备中,或者将晶片处理设备中加工过的晶片转送到仓库中。图 3.100 为 AGV 系统。

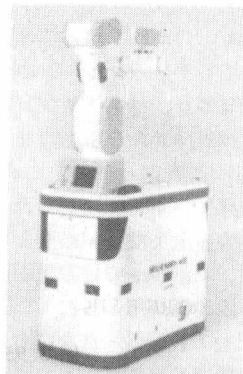


图 3.99 洁净间用的 AGV 外观(Assist 新兴)

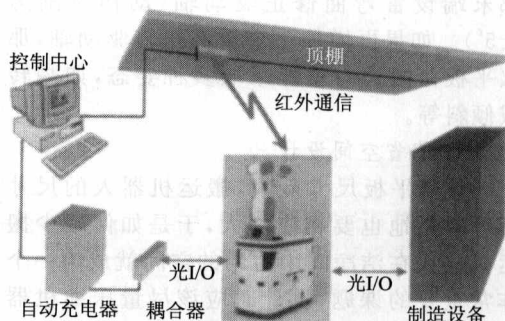


图 3.100 AGV 系统

AGV 系统由控制全局的控制中心、多台 AGV、多台自动充电器构成。1 台控制中心最多可以同时控制 10 台 AGV,控制中心与 AGV 通过安装在洁净间顶棚和 AGV 本体上的红外通信单元进行通信联系,接受转送的命令或告知 AGV 本身的状态。

主计算机向控制中心发出转送命令后,控制中心即对多台 AGV 中处于空闲状态的 AGV 发出输送任务命令。控制中心和 AGV 持有相同的地图,控制中心在搜寻到达目的设备的最优路径后将它传送给 AGV。

AGV 根据接收的路径信息,在参考地图的指引下向目的设备行进。一旦到达目的设备,AGV 便通过红外线并行光 I/O(input/output)与制造设备进行互锁控制(interlock control),同时将托盘送出去。

AGV 以电池作为动力源,为了使系统 24 小时不间断运行,本系统采用了快速自动充电系统。AGV 到达目的设备后,在开始转移物料前伸出与自动充电器对接的耦合器(coupler)电极,接通 AGV 的充电电极,边转移物料边进行充电,于是 AGV 能够实现 24

小时不停地工作。

3. 洁净间的规格

洁净间的洁净度的指标是 XX 级, XX 的数字越小, 洁净度越高。

1 级是指体积 1ft^3 ($1\text{ft}^3 = 2.831\ 685 \times 10^{-2}\text{m}^3$) 的空气中含有 $0.1\mu\text{m}$ 的尘埃粒子数小于 1 个的洁净环境。晶片的周围气氛必须小于 1 级, 这是因为半导体内部电路图形(电路布线)的最小宽度越来越细了, 现在的工艺水平已经达到 $0.13\mu\text{m}$, 如果在晶片上落有些许灰尘, 在曝光等工艺过程中就无法顺利完成图形生成的工序(发生断线问题)。

采用晶片盒运载 200mm 晶片时, 肯定要接触到外部空气, 因此整个洁净间都必须维持 1 级洁净度。同样, AGV 必须在 1 级空气洁净度环境中输送物料, 因此必须设法使 AGV 不给洁净间的洁净度造成麻烦。

在转移晶片盒时, 它是被 AGV 的机械手直接抓握的, 因此所有通往机械手各个关节电机的电缆全部都应该密闭于机械手的内部结构中。

即便如此, 由于毕竟还留存无法密封的部位(比如, 关节结合部等), 因此在机械手的内部应该留有负压抽吸通道, 并通过车身下方的 ULPA(Ultra-Low Penetration Air, 超高效空气)过滤器排出, 避免对晶片产生污染。

为了维持洁净间的洁净度, 整个顶棚上都设置有过滤器, 地面则敷设金属孔板, 使空气以一定的速度自顶棚垂直向下流动, 这种方式称为垂直层流。由于在垂直层流中移动的 AGV 不免会扰乱气流, 所以 AGV 常常被设计成圆弧形结构。

4. 导航

AGV 的移动导航可以采用车轮编码器、磁性定点标记、陀螺仪等。为此, 洁净间地面敷设有边长 600mm 的方形金属孔板, 小孔直径为 8mm 。

这些小孔中埋有永磁铁(磁性标记), AGV 上搭载的磁性传感器能够检测出它的磁场, 于是得以在行进过程中不断地检测和修正自身的位置及姿态(x, y, θ)的误差。磁性标记按大约 600mm 的间距进行布置, 算起来每块金属孔板设置一个即可(图 3.101)。

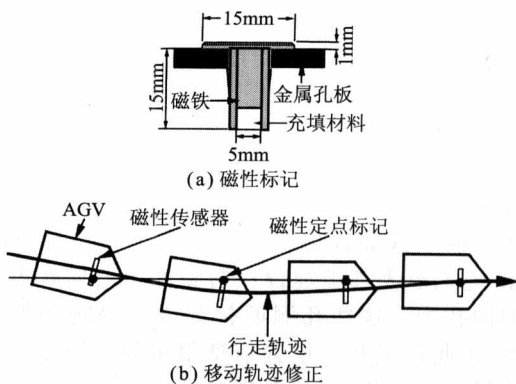


图 3.101 AGV 导航

维持洁净间洁净度的开销往往十分巨大, 所以输送系统所占用的空间应该尽可能地小, 实际上 AGV 的活动空间确实很狭小。为了把托盘转运到布满狭小空间的目的设备上, AGV 是一台具有 2 个驱动和 3 个转向的全方位行走机构。图 3.102 所示为 AGV 的行走模式。

5. 搬运位置修正

AGV 的运动定位精度不大于 $\pm 10\text{mm}$, 但托盘的操作精度却需要达到 $\pm 1\text{mm}$ 。

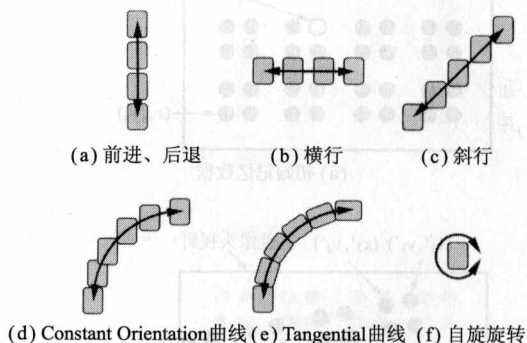


图 3.102 AGV 的行走模式

如图 3.103 所示, AGV 的车身内部设有 CCD 摄像头, 能靠图像识别计算停止误差。

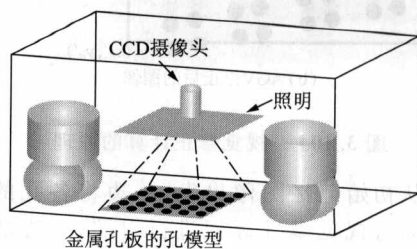


图 3.103 视觉识别装置

车身内部下方的 CCD 摄像头利用镜头周围的红外线 LED 进行照明。这样做也是为了防止周围散光源的干涉。

最初可以用手动方式使 AGV 在正确的位置上定位,地面金属孔板孔的坐标事先已经作为地图数据的一部分被储存起来,此外作为视觉基准标记的坐标也已经被存储起来,它们事先都被埋设在与磁性标记形状类似的孔中。这些孔洞的排列方式呈现周期性,因此设定基准位置信息很重要。视觉基准标记就充当了这个位置基准。

如果 AGV 自动行走走到设备前停下来准备装卸物料,首先它会将当前停止状态下采集到的地面视觉数据与先前示教的视觉数据进行比较,计算出与理想停止位置之间的偏差 (x, y, θ) ,将该数据反馈至计算机的动作控制,最后就可以实现 $\pm 1\text{mm}$ 的搬运定位精度。

图 3.104 为视觉修正计算的原理。

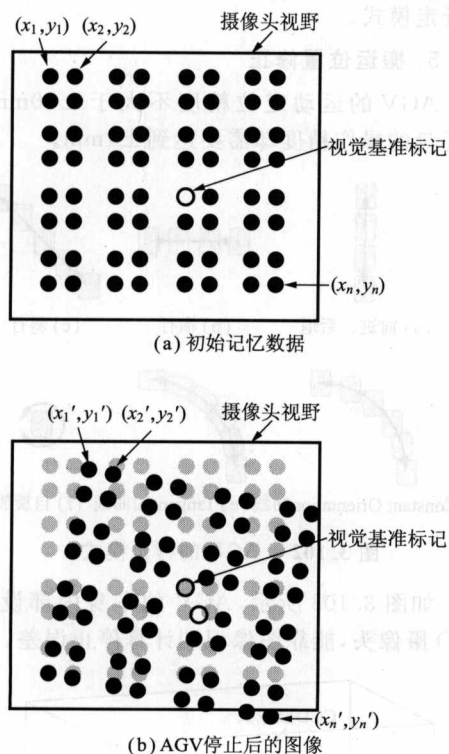


图 3.104 视觉修正计算的原理

从初始记忆图像出发,一边将各孔的中心坐标与视觉基准标记进行对照,一边加以记忆。

然后,获取 AGV 停止后摄像头采集到的

新图像,将孔板上各个孔的位置与视觉基准标记的位置关系一一进行对照。由图 3.104 可知,除原始记忆数据中右下方的三个板孔超出摄像头视野,无法利用之外,其他大多数孔的数据仍然能使用,所以对精度并无影响。

6. 运行控制

为了防止多台 AGV 在同一区域内移动时产生冲突,必须实行高效的运行控制机制。在控制中心对 AGV 发出运行命令之前,首先应该对由哪台 AGV 执行该次任务的问题作出适当的选择,并搜索最佳路径。

然后,控制中心应该考虑正在运行中的 AGV 的路径等因素,建立运行时间表。当控制中心将输送命令和路径信息(按照哪条路径行走,以及哪台为目的设备)传达给 AGV 后,AGV 开始行走。控制中心同时与多台 AGV 进行通信联络,实时应对动态状况。

如果 AGV 之间出现竞争路径的情况,控制原则是根据时间表的安排,在交叉点处首先放行优先级高的 AGV,优先级低的 AGV 则等待优先级高的 AGV 通过后再行走。

如果出现某一台 AGV 因故障停止的情况,则需要重新搜索和修改其他 AGV 的行走路径,命令它们绕过无法通过的区域。这样即使某一台 AGV 停止了运行,其他的 AGV 也仍然能够正常地工作。

在提高搬运效率方面,目前的控制系统已经具有这样的功能。在 AGV 从某一台设备将托盘转送到另一台设备的过程中,如果发现该路径上的另一台设备同时发出搬运请求,可以让该台 AGV 在途中顺道到新设备处接收新的托盘。

7. 安全

欧美各个国家的半导体生产厂家非常重视安全。特别是进入生产 300mm 晶片的时代以来,世界的安全规范都更加完备了,它们发挥着非常重要的作用。

AGV 属于移动机器人,它也应该满足机器人的安全规范。下面是为它制定的主要安全规范。

① SEMI S2. 半导体制造设备的环境、健康、安全指南。

② ANSI/RIA R15.06. 美国工业机器人安全规范。

③ ISO 10218(EN 775)。国际标准化组织工业机器人安全规范。

④ JIS B 8433。日本工业标准工业机器人安全规范。

⑤ NFPA 79。美国工业机械电气安全规范。

⑥ IEC 60204-1。国际工业机械电气安全规范。

⑦ JIS B 9960-1。日本工业标准工业机械电气安全规范。

⑧ SEMI E 33。半导体制造设备 EMC 规范。

⑨ 欧洲机械命令、低压电命令、EMC 命令。

EMC(ElectroMagnetic Compatibility, 电磁兼容性)是电磁兼容性的简称。它表示设备对外界释放的电磁场的强度,以及反过来,外界电磁场在多大程度上将造成设备误动作的一个指标。

包含运输设备 AGV 在内的洁净间中的移动设备都应该承担 SEMI S2 安全规范中规定的义务。

由全世界 2500 多个半导体相关企业结成的联盟组织 SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International, 国际半导体设备和材料组织)制定了数百种规范,其中 SEMI S2 安全规范规定了所有半导体制造设备安全所要求的全部事项。与 ISO 规范类似,该规范参照了上述所有的安全规范,适合该规范必然也就满足了上述所有规范的要求。

为了能满足安全规范的要求,AGV 搭载了多种安全传感器。图 3.105 给出用于 300mm 晶片搬运的 AGV 所应搭载的安全传感器的例子。

在 AGV 四周装有方向指示灯、状态指示灯,可以从视觉上向周围提示 AGV 的移动。此外,在移动过程中,AGV 还发出清脆悦耳的乐曲声,从听觉上引起人们的注意。

整个车身底面的四周(自地面高 15mm 处)和上部装有缓冲器,不管从哪个方向发生碰撞它都能停止下来。

为检测整个车身的周围情况,车身四周在相应于人的脚、膝盖、胸部 3 个高度上装有红外线传感器,使其在前进后退、横行、转弯

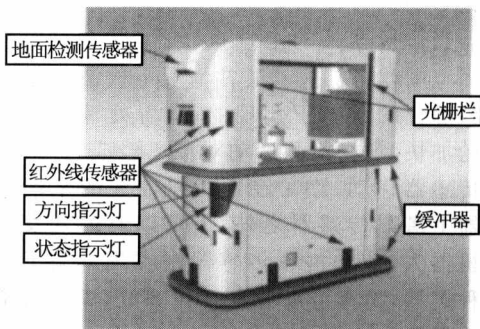


图 3.105 AGV 上配备的安全传感器

时均能发现人的侵入。

洁净间内敷设有金属孔板,AGV 在其上进行行走。在检修地板下面的管道时可能需要将其掀开。为了避免因这种情况的发生而造成 AGV 的倾倒,在 AGV 上搭载了地面检测传感器,当它发现地面有空洞时能够紧急停车。

最后,整个机械手都覆盖防护罩,开口部分有光栅栏保护,因此在工作过程中如果有人伸手进入时,机械手会立即停止工作。

如上所述,虽然 AGV 是自动输送设备,由于经常可能出现人机混杂的情况,因此 AGV 必须具有完备的人身安全对策。

对 21 世纪的机器人,包括移动机器人在内来说,一个毋庸置疑的事实是无论它的能力、性能、成本如何,安全将是机器人的关键指标之一。

大西正纪

3.7 测量、检查及试验

为确保产品质量,在生产过程中的测量、检查、试验具有非常重要的意义。如果测量结果能够实时地反馈到生产当中,就有利于保持制造过程的高精度。特别是在今天,人们都认同应该在制造初期尽早发现废品,杜绝它流入后续制造工序,因而往往在设计阶段就把检查工序作为生产线的一部分组合到整个生产线中。这样不仅能尽早发现废品和采取相应的措施,而且对避免因离线检测所造成的工序内库存减少的现象十分有效。该项技术的实现也可以大大推动计量技术和信息处理技术的发展。

生产线使用的传感器长期以来都是以固定的形式进行工作的,如果将传感器与机器

人的末端执行器固定在一起,或者索性将传感器当作机器人的末端执行器,那么它们的应用范围就将扩大。通常情况下检测都是在对象静止的状态下实现的,随着处理装置速度的加快,现在检测运动对象已经成为可能。让传感器移动,除了在通用机器人的末端执行器上搭载传感器之外,还可以通过开发专用机器人,让它搭载传感器来实现。关于后一种类型,简直可以说是百花齐放,煤气管道检查机器人^[1]就是其中的一个例子。

在检查和试验的工序中,除检查外观外,很多情况下需要开展内部异常情况的检测,如运转设备异常发热检测等。外观检查通常采用 CCD 摄像头,而内部检查则借助于 X 射线,热分布检测利用红外线摄像头等。工业 X 射线无损检测装置可以获得被检查对象任意截面的信息,在短时间内完成缺陷和异物检测、密度分布测量、内部结构的尺寸测量、三维数据采集(基于连续断面摄影)等,因此它的应用非常广泛^[2],图像处理技术在这些图像数据的分析利用方面发挥了重要作用。在电子产品制造领域,将 CCD 摄像头搭载在直角坐标移动单元上可以完成基于图像处理的印制电路板焊接质量和元器件封装质量等状况检查的任务。

在检查工序中,除上述将传感器作为末端执行器搭载在机器人上使用之外,机器人还可以在通用的搬运、码垛等作业中担负把对象零件插入专用检查设备接受检查,或者按检查结果对产品进行分类等任务。

下面介绍一些测量、检查、试验的具体事例。它们在连接件和紧固件方面的应用可以参见本章 3.5.3 节中讨论的螺钉检查方法。

3.7.1 汽车制造应用事例

汽车车身的装配精度对质量有很大的影响。下面介绍“汽车车身自动测量系统”的应用实例。该系统由主计算机、6 台机器人、光学传感器、视觉传感器等构成,针对所生产的每一辆汽车——检测若干个关键点状态,执行质量管理。这些关键点对车身的精度具有重要影响。

在过去,汽车车身的喷涂检查大多是由人工目视完成的,现在有了流水线上全面、自动检查汽车车身喷涂质量的应用实例(图

3.106)。进行侧面检查的多关节机器人末端执行器携带传感器单元(检测头)需要跟踪流水线运动,因此它被搭载在平行于生产线的移动平台上。这样的机器人共有 2 台,分别位于流水线的两侧。为检查汽车的顶部配备了 2 台装有检查头的顶棚悬挂式直角坐标机器人。在本实例中,传感器单元分别采用“狭缝图形投影检查仪”和“狭缝光投影检查仪”,前者将狭缝图形投影到喷涂表面,利用 CCD 摄像头拍摄图像,经图像处理按照图形的变形情况来判断喷涂表面的缺陷,它负责喷涂车顶的部分检查任务。其余的任务则由后者来完成。后者将激光照射到喷涂表面,再把反射光投影到漫散屏幕上,在消除曲面的影响后,利用 CCD 摄像头进行缺陷的检测^[4]。

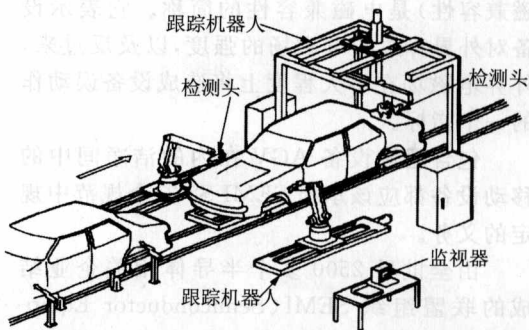


图 3.106 喷涂外观的检查机器人
(丰田中央研究所)

3.7.2 用于电子设备制造的检测机器人系统^[5]

在生产 CNC、机器人等各种控制装置电子工厂内,完工的印制电路板的电路试验、装配后的单元功能试验、成品环境试验等都可以利用检测机器人系统来完成。

例如,在印制板电路的电路试验中,多关节机器人可以负责将无人搬运车转送来的搬运架上的完工印制电路板取出,送入在线试验装置中,试验完毕后再将其取出。

单元功能试验也是在装配工序中在线实现的。机器人搬运完工的伺服放大单元进行功能试验(与同样规格的伺服电机连接后运行试验运转程序,与基准值进行比较以判断是否合格)。

在成品检查中,机器人将成品置于 PLC (Programmable Logic Controller, 可编程逻辑

控制器)控制的温度试验机中进行检查。

3.7.3 油管接头螺纹检测机器人^[6]

油管接头螺纹加工完毕后,将环规旋进管端,通过测量旋进量或检测与密封垫的接触程度即可以了解接头螺纹的加工精度。油管接头工件较重,环规的质量一般也都超过15kg,为了完成螺纹检查作业的连续自动化动作(环规自动脱离、旋进量自动测量等),人们开发了油管接头螺纹检查机器人。它是一台6轴多关节机器人,它的特点在于其手部机构是一个5个自由度的柔顺螺旋旋进机构。另外还有一个卡死检测机构,能对螺旋旋进动作加以控制。

油管接头螺纹检查机器人的作业对象是钢管,管径不同或管弯曲等原因会造成钢管定位的偏心,因此需要在机器人手部安装摄像头以识别钢管的位置,再根据图形匹配和面积形心计算来识别钢管的中心线。

3.7.4 试剂库自动识别系统^[7]

试剂库自动识别系统如图3.107所示。机器人(参见表3.12的规格表)的任务是按照计算机的命令从多种试剂中识别出指定的试剂(参见表3.13工件规格表)。试剂的分组情况是每25种(5×5 种)试剂放在同一个试剂盒中,而试剂盒则置于一个8层8工位的多层回转仓库($25 \times 8 \times 8 = 1600$ 种)内。下面是试剂的拾取步骤:

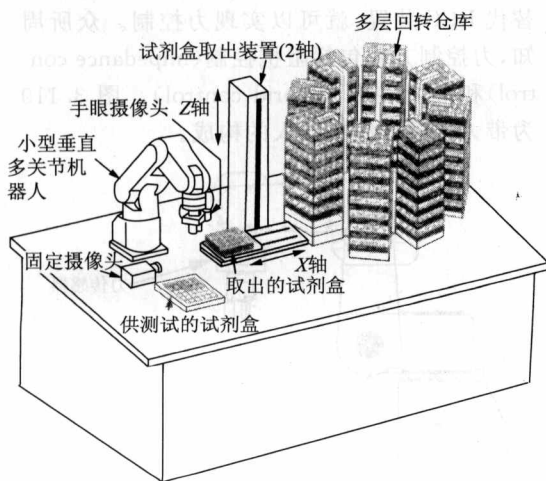


图 3.107 试剂库自动识别系统(三菱电机)

表 3.12 机器人本体主要规格

项 目	内 容
机械结构形式	垂直多关节机器人
轴数	5 轴
额定负载(可搬重量)	2kg
重复定位精度	$\pm 0.02\text{mm}$

表 3.13 工件规格

项 目	内 容
工件名称	试剂容器(微型试管;玻璃制)
主要尺寸	$\phi 6 \times L12\text{mm}$
重量	0.005kg

① 接受计算机的命令,通过多层回转仓库(1个转轴,作为机器人的附加轴受控)和试剂盒取出装置(2轴:X轴、Z轴)进行协调控制,将指定的试剂盒拾取到机器人的工作空间内。

② 机器人运动至被取出的试剂盒的指定试剂的上方,借助于手眼摄像头从上方确认有无试剂,然后取出试剂。

③ 机器人利用固定摄像头对粘贴在被取出的试剂容器一侧的文字标签加以识别(图3.108),然后将其放入指定位置。

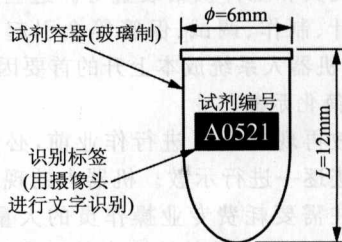


图 3.108 工件外观图

试剂库自动识别系统的导入可以取得以下效果:

① 提高了生产率。试剂的平均取出时间为30s,几乎与人工同步。

② 节省人工。省去了人工作业所需要的一名操作员。

③ 稳定和提高识别质量。杜绝了人工失误,确保100%的识别可靠性。

④ 适应多品种识别。增加多层回转仓库中试剂盒的层数就可以增加试剂的品种。

⑤ 改善了劳动环境。机器人的导入使操作人员从细微的作业中解放出来。

市川 诚 今泉武男

3.8 工业智能机器人

3.8.1 工业智能机器人的目的和作用

工业机器人(industrial robot)广泛应用于材料搬运(material handling)、点焊(spot welding)、弧焊(arc welding)等许多领域。

直到20世纪90年代,工业机器人实现位置和速度控制的主流方法还停留在示教再现(teaching playback)的方式上,即先由人工进行示教(teaching),以程序的形式记忆位置和轨迹,然后再重复动作。这样的方式的改进目标如下。

1) 满足复杂装配作业的要求

在传统装配作业中,往往依赖熟练操作人员的经验对装配力的大小作微妙的调整,例如,工件之间间隙只有数微米的配合作业,齿轮装配作业等。这类作业仅仅通过示教再现的方式是很难完成的。

2) 削减周边设备的数量

对于示教再现机器人来说,被操作的工件必须按照一定的方式整齐排列,因此为了工件的定位和排列,需要配备很多外围设备,如定位夹具和工件供给装置等。这些周边设备的设计、制作、调试、保管等会引起费用的增加,是机器人系统成本上升的首要因素。

3) 简化示教作业

示教再现机器人进行作业前,必须对其运动轨迹逐一进行示教。机器人的现场示教作业往往需要耗费专业操作员的大量工时。作业越复杂,对示教熟练程度的要求越高,示教时间就越高。

为解决上述问题,20世纪90年代后期,人们开始关注智能机器人。智能机器人利用视觉传感器(vision sensor)、力传感器(force sensor)等来识别外部状态,实现自主运动。本节将简要介绍现有的工业智能机器人(industrial intelligent robot)。

3.8.2 基于力传感器的机械装配作业

在这里以基于力传感器的装配作业(fitting)为例加以说明。看一下圆柱形轴插入孔的精密配合作业(precise fitting)、齿轮装配作业、汽车的自动变速(automatic transmission)部件——离合器单元的装配作业。它们都属

于已经在工厂中被广泛使用的成熟技术。

1. 零件的精密配合作业

面对圆轴插入孔的作业,仅仅是工件与孔的位置不确定这个问题就使示教非常困难,如果是精密装配,轴-孔之间的间隙只有数十微米,示教几乎不可能。为实现这类作业的自动化,目前的方法是在机器人末端安装RCC(Remote Center Compliance,远中心柔顺结构)装置。

RCC的原理如图3.109所示。在工件做横向移动的同时,该机构可以柔和地围绕柔顺中心旋转,吸收工件与孔之间的位置和姿态误差,完成插入装配。

RCC装置的缺点在于其柔顺中心是固定的,因此对每一种工件必须准备不同的RCC装置。另一个缺点是它的弹簧比较软,只能用于铅垂方向的插入作业,因为这样不受重力的影响。

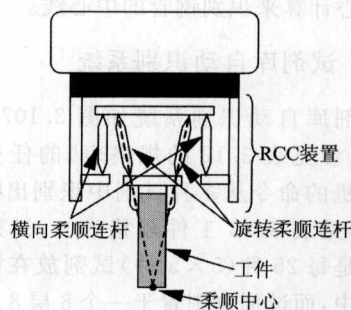


图 3.109 RCC 装置

若在智能机器人的手部安装力传感器来替代RCC装置,就可以实现力控制。众所周知,力控制方式包括阻抗控制(impedance control)和混合控制(hybrid control)。图3.110为带力传感器的机器人的构成。

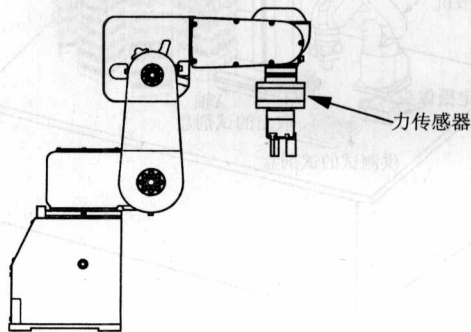


图 3.110 带力传感器的机器人

图 3.111 为插入过程中力传感器所受到的力和力矩曲线。如果工件存在姿态误差,工件插入孔时就会产生力矩。工件姿态控制的目标就是让该力矩值为 0,姿态误差被消除后,即可顺畅地完成插入装配。

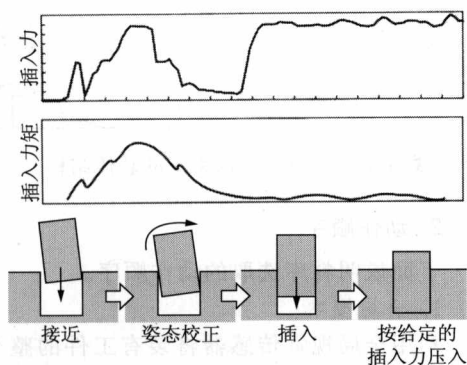


图 3.111 插入作业和插入中的力与力矩

该方式具有以下优点:

① 可实现仅有数微米到数十微米的配合间隙的精密配合装配作业。

② 可以由软件来改变柔顺中心及力控制的响应性能,无需更换专用工具即可适应多种类型工件的装配。

③ 可实现横向和斜向配合作业。

2. 齿轮装配

齿轮装配往往需要掌握配合时的微小力度。图 3.112 为行星齿轮(planetary gear)装配的例子,作业的难度是必须一面让太阳轮齿和行星轮齿啮合,一面同时完成装配。

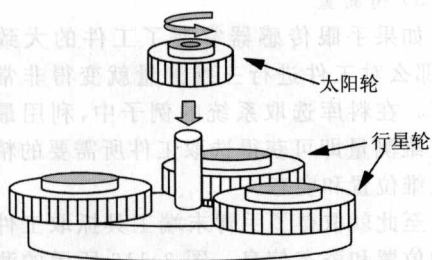


图 3.112 行星齿轮的装配作业

为了完成齿轮装配,在对正角度的同时还必须施加适当的压入力。如果压入力过小,即使角度对得很正也无法插入;相反,若压入力过大,又会发生两个齿轮同时旋转的问题。

采用力控制,就能够既施加不伤害齿轮的压入力,又能对正角度。

3. 离合器单元装配

在汽车生产线中,机器人广泛应用的作业有焊接、喷涂等。发动机和变速器的装配一度是例外,因为相关作业的复杂程度很高,一向完全依赖于人工完成。直到 20 世纪 90 年代后半期才逐渐出现自动装配的实例。

下面给出装有力传感器的机器人完成汽车自动变速部件——离合器单元装配作业的应用例子。如图 3.113 所示,离合器单元由离合器组件(clutch pack)和离合器从动盘毂(clutch hub)组成,离合器组件内有 3~7 片切有内齿的摩擦片,离合器从动盘毂的外圆面则被切成外齿,装配时应该保持齿与齿之间的啮合,同时将离合器从动盘毂插入离合器组件内。为了让离合器摩擦片在 XY 平面内能运动,装配时必须满足平面内的位置和齿的角度同时对正的要求。实际上,离合器摩擦片的位置是不确定的,因此往往需要在 XY 平面内经过多次尝试,否则就无法插入。

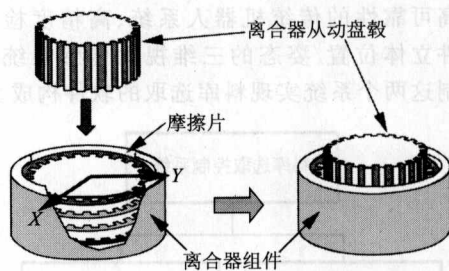


图 3.113 离合器单元的装配

借助于力传感器就可以同时控制插入方向的力和绕插入轴的力矩,以消除力和力矩为目标进行位置和姿态调整,就可以在装配中避免工件的损伤。

执行这项作业的操作人员往往很劳累,因此十分渴望能实现自动作业。智能机器人的引入不仅使人们从繁重的劳动中解放出来,同时也提高了生产效率和产品的可靠性。

3.8.3 基于视觉传感器的周边设备的简化

在工业机器人制造系统中,通常需要将工件按照一定的位置排列整齐,然后再提供给机器人进行作业。工件的定位和排列方法有:①由操作人员事先将工件排列整齐;②借助于专用的定位平台或料库供应(人工完成

向平台或料库的码放);③采用振动供料器将零件排列整齐等。用户应该根据工件的形状和大小选择适当的方法。

由上述可知,为了能让工件定位和排列整齐,实际上每一个工件都需要准备昂贵的定位夹具和周边设备,这些周边设备的设计、制作、调试、保管所耗费的工时往往是造成引进机器人系统成本过高的主要原因。

所谓料库选取(bin-picking),是指借助于机器人从杂乱无章的工件堆里拾取工件。尽管生产第一线对于解决这类问题的呼声非常强烈,也作过诸多尝试,但是实用的例子十分鲜见。

直到20世纪90年代后半期,基于三维视觉传感器的料库选取系统投入使用之后,能够像人那样从杂乱堆积的料库中直接选取工件的作业才终于成为可能。

1. 系统构成

图3.114为该系统组成的概念图。系统由高可靠性的传统机器人系统、高精度检测工件立体位置/姿态的三维视觉传感系统及控制这两个系统实现料库选取的软件构成。

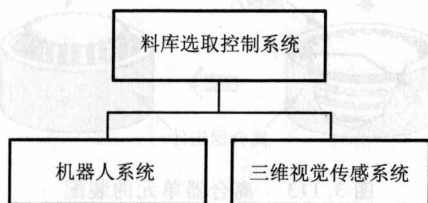


图 3.114 系统组成的概念图

图3.115为基于机器人的料库选取系统的具体构成。系统以PC机(内装料库选取控制系统和三维视觉传感系统软件)为核心,机器人控制器通过以太网与PC机相连,机器人手臂末端装有三维视觉传感器。三维视觉传感器内有感光元件,基准光源采用狭缝激光光源,能从两个不同的方向照射缝隙光。

机器人面临的是一个工件被散乱堆放的料库,料库上方有一个独立的CCD摄像头。三维视觉传感器、CCD摄像头所采集的图像由PC机进行处理。

下面将三维视觉传感器简称为手眼传感器,独立的CCD摄像头简称为全局视觉传感器。

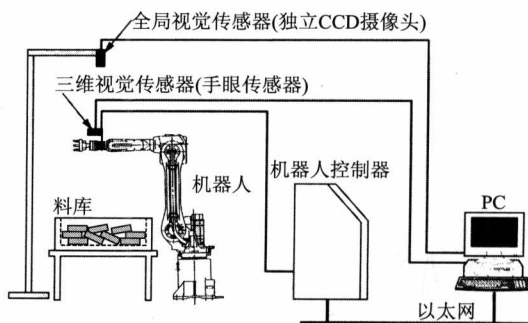


图 3.115 料库选取系统的总体结构

2. 动作顺序

下面说明料库选取的动作顺序。

1) 全局搜索

利用全局视觉传感器将装有工件的整个料库拍摄下来,从图像中选取与预先示教的模型相同的工件,再由料库选取控制系统从检测的结果中选定一个工件,并命令手眼传感器移动到该工件附近,进行下面所说的粗测量。

2) 特定工件的粗测量

所谓粗测量就是用手眼传感器的结构光照射被全局搜索到的特定工件,计算该工件的三维位置和姿态。由于在全局搜索中并未获得工件的姿态信息,因此在粗测量中工件与传感器的位置关系未必适当,粗测量的结果有时无法满足拾取操作所需的精度。为了修正粗测量的结果,还需要执行下面的精测量。

3) 精测量

如果手眼传感器掌握了工件的大致位置,那么对工件进行三维测量就变得非常简单了。在料库选取系统的例子中,利用最后的三维测量即可获得选取工件所需要的精确的三维位置和姿态。

至此就取得了手臂末端工具抓取工件所需的位置和姿态信息。图3.116所示的测量误差横条的宽度定性表示了上述过程中每一步所取得的信息与测量的精度。这表明通过手眼传感器的反复测量有效地提高了测量精度。

3. 干涉回避和错误自动恢复

执行取出作业时,不仅要利用传感器检测工件的位置和姿态,而且要尽量缩短由错

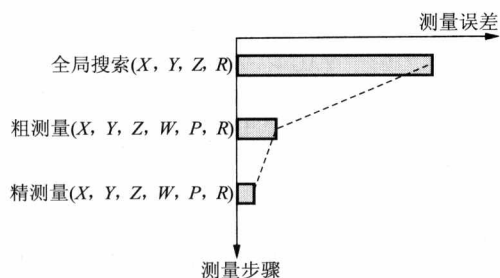


图 3.116 通过反复测量能主动地提高测量精度

误引起的停车时间。万一出现意外错误致使系统停止,本系统能够通过对错误原因的分析,自动消除错误状态,保证系统的运行率不至于过低。

机器人与周边设备的干涉也是偶发错误之一。本机器人具有碰撞感知功能,一旦感知机器人的负载突然增加,机器人控制器能够在瞬间停止运动,从而防止设备被破坏,并起到提高系统运行率的作用。

4. 料库选取的应用举例

图 3.117 为智能机器人选取铸件的应用实例。置于机器人前方的 $1000\text{mm} \times 800\text{mm} \times 400\text{mm}$ 料库中散乱堆放着各种铸件,机器人利用三维视觉传感器测量料库中工件的位置、姿态信息,然后将其取出。工作周期包括测量时间和工件处理时间,总共为 $10 \sim 20\text{s}$ 。

图 3.118 是一个给机床提供工件的应用实例。末端装有三维视觉传感器的机器人将工件从料库中取出,然后提供给加工中心。



图 3.117 工件取出动作(FANUC)

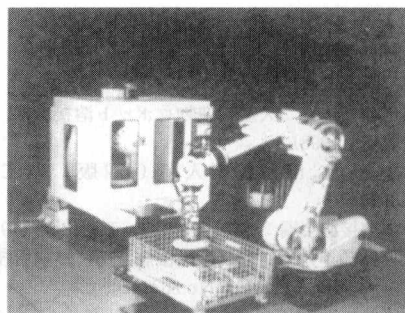


图 3.118 向机床提供工件(FANUC)

3.8.4 基于传感器的示教简化

图 3.119 介绍了将视觉传感器和离线编程组合起来简化弧焊接机器人示教的应用实例。利用视觉传感器图像指定焊接线的起始点、终点,以及路径上的中间点,再利用视觉传感器跟踪焊接线,自动生成机器人运动程序。在机器人实际运行规划的动作路径之前,还可以事先在监视器上核对路径。

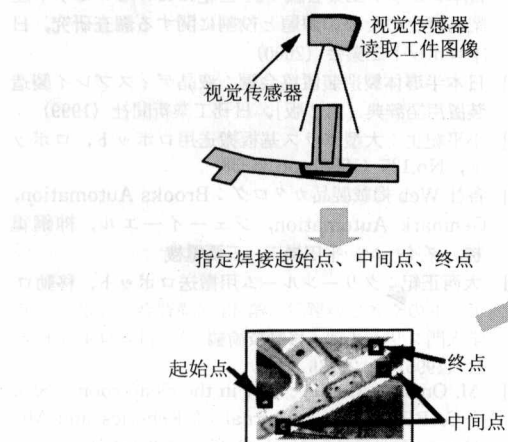


图 3.119 弧焊路径的自动生成

3.8.5 结论

传感器技术的发展,使装有传感器的智能机器人能在更少的周边设备和更短的示教作业时间的条件下实现复杂作业。虽然目前在生产现场智能机器人的应用实例还不多,但我们可以预计今后它的重要性将越来越突出,应用实例也将不断增加。

菅野一郎 泷泽克俊 伴一训 佐藤贵之

参考文献

- 3.2 焊接
 - [1] 竹内直記ほか:大型構造物ロボット溶接教法,成山堂書店(1998)
 - [2] 小林一清:溶接技術入門(第2版),理工学社(1999)
 - [3] 日本溶接協会編:溶接実務入門,産報出版(1996)
 - [4] 中西紀晶:スラグ自動除去機能,神戸製鋼所技術レポート [II], Vol.40, No.363 (2000)
 - [5] 川上浩司:ARCMAN-RON 鉄骨溶接システム 無監視運転を支える各種機能と周辺機器,神戸製鋼所技術レポート [II], Vol.38, No.341 (1998)
 - [6] 川上浩司:鉄骨溶接ロボットシステムを支えるセンシング機能,神戸製鋼所技術レポート [II], Vol.40, No.358 (2000)
 - [7] 清原裕次ほか:レーザセンサを用いた高性能アーク溶接ロボット,ロボット, No.113, 日本ロボット工業会 (1996) pp.18-25
 - [8] cim station,
<http://www.msr.mes.co.jp/MS/Cim/index.htm>
 - [9] 芝池雅樹:オフラインティーチングシステムを組み合わせた溶接ロボットシステム,神戸製鋼所技術レポート [II], Vol.41, No.380 (2001)
 - [10] 安川電機:自動車用排気系部品の薄板アーク溶接ロボットシステム,日本ロボット工業会,
http://www.jara.jp/jp/x1_jirei/jirei.htm
 - [11] 奥田滝夫:スポット溶接入門,産報出版(1986)
 - [12] 中村孝ほか:抵抗溶接,産報出版(1996)
 - [13] ホンダエンジニアリング:フレキシブル車体溶接ラインシステムの開発,
<http://www.honda.co.jp/EG/company/frakisible.html>
 - [14] 井上製作所:トランスガン,
<http://www.fitec.co.jp/inoue/index.htm>
 - [15] ビー・エル・オートテック:自動車部品ワーク持ちスポット溶接システム,日本ロボット工業会,
http://www.jara.jp/jp/x1_jirei/jirei.htm
 - [16] スポット溶接のシミュレータ eM-Spot,
<http://www.tecnomatix.co.jp/product/product2/product3/product4/spot.html>
 - [17] ファナック:自動車車体への高密度増打ちスポット溶接ロボットシステム,日本ロボット工業会,
http://www.jara.jp/jp/x1_jirei/jirei.htm
- [18] レーザ加工学会:レーザ加工とは,
<http://www.jlps.gr.jp/index.htm>
- [19] ハイブリッド YAG レーザ溶接ヘッド,
<http://www.mhi.co.jp/news/sec1/020423.html>
- [20] 富士プラスチック透過溶接レーザ装置,
<http://www.fujielectric.co.jp/denki/fa/05.html>
- [21] 日鐵住金溶接工業,
<http://www.nsswelding.co.jp/index.html>
- [22] 服部和隆ほか:ファインプラズマ切断ロボット導入による切断加工の合理化,ロボット, No.105 (1995.7) pp.68-84
- 3.3 喷涂
 - [1] 労働省産業安全研究所:工場電気設備防爆指針(1979)
 - [2] 本間敬章:不二越技報, Vol.56, No.1 (2000) pp.38-42
- 3.4 去毛刺
 - [1] 高沢孝哉:バリ取り・エッジ仕上げ作業の自動化の最近の動向,機械技術, Vol.40, No.9 (1992) pp.18-21
 - [2] 杉浦哲二:省スペース 1 BOX バリ取りの紹介,豊工技報, Vol.35, No.3 (1995) pp.26-32
 - [3] 中嶋広尚:ロボットシステム紹介(バリ取り編),豊工技報, Vol.27, No.3 (1987) pp.38-44
- 3.5 装 配
 - [1] 瀧口昌之:日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1 (2001) pp.37-38
 - [2] 瀧口昌之:精密工学会誌, Vol.68, No.4 (2002) pp.499-502
 - [3] ロボット工業会編,ロボットハンドブック,ロボット工業会(2001) pp.294-295
- 3.6 浄 化
 - [1] 牧野洋ほか:平成10年度 クリーンロボットのニーズ調査報告書,日本機械工業連合会(1999)
 - [2] 前田和夫:はじめての半導体製造装置,工業調査会(1999)
 - [3] 日本半導体製造装置協会編:半導体製造装置用語辞典[第5版],日刊工業新聞社(2000)
 - [4] 日本ロボット工業会編:21世紀におけるロボット産業高度化のための課題と役割に関する調査研究,日本ロボット工業会(2000)
 - [5] 日本半導体製造装置協会編:液晶ディスプレイ製造装置用語辞典[第2版],日刊工業新聞社(1999)
 - [6] 小紀紀生:大型ガラス基板搬送用ロボット,ロボット, No.125 (1998) pp.35-38
 - [7] 各社 Web 掲載製品カタログ:Brooks Automation, Genmark Automation, ジェーイーエル, 神鋼電機, ダイヘン, 平田機工, 三菱電機
 - [8] 大西正紀:クリーンルーム用搬送ロボット,移動ロボットのやさしい解説(第43回講習会—ロボット工学入門シリーズVIII<移動技術編>),日本ロボット学会(1995) pp.27-36
 - [9] M. Onishi: Mobile robot in the clean room—SEL—CARRY ACE—, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.9, No.4 (1997) pp.256-261
 - [10] 大西正紀:米国における産業用ロボット安全規格の考え方,第30回安全工学シンポジウム(2000) pp.

- 25-28
- [11] 大西正紀：半導体製造装置におけるリスク認識と安全方策，第31回安全工学シンポジウム（2001）pp. 69-72
- [12] 大西正紀：半導体搬送システム ANHS の現状，SEAJ Journal, No.85（2003）pp.26-30
- 3.7 測量、検査及試験
- [1] 藤田明孝：ガス導管検査用ロボットの開発について，ロボット，No.59，日本ロボット工業会（1987）
- [2] エクスロン・インターナショナル：非破壊検査について，<http://www.yxlon.co.jp/2-1.html>
- [3] 山本克己ほか：オンライン自動車ボディ計測システ

- [4] ム, ロボット, No.59, 日本ロボット工業会 (1987)
- [4] 松田守弘: 自動車の塗装外観計測, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.29, No.2 (1994)
- [5] 大塚和久ほか: 電子機器製造における検査ロボットシステム, ロボット, No.111, 日本ロボット工業会 (1996) pp.22-27
- [6] 生澤勝美: 油井管継手ネジ検査ロボットの開発, ロボット, No.111, 日本ロボット工業会 (1996) pp. 34-39
- [7] 三菱電機: 試薬ライブラリ自動選別システム, http://www.jara.jp/x1_jirei.htm

第4章 机器人与安全

无论技术如何有效,为了获得国际认可,就应从世界的角度来考虑安全问题。在20世纪,日本自诩为机器人王国,对国际安全规范也十分了解。但是进入21世纪,日本能否在服务机器人领域继续领先于世界,则与日本机器人技术是否能够执行国际认可的安全体系密切相关。

在2000年,世界的75万台工业机器人中,大约有35万台在日本服役。为什么机器人在日本会如此普及呢?从应对危险和有害环境作业的角度来看,当然是劳资双方共同努力的结果,不过首要原因应该归功于日本能够确保机器人使用的安全。人一旦和机器人的铁臂发生冲突就会酿成重大事故,人若被机器人的铁臂挤住,则很难逃脱。实际上,通过总结多次事故的经验教训,人们已经制定了严格的作业规程,即机器人必须在栅栏内进行作业,作业未停止绝不允许人接近它。正是由于这种基于时空隔离的安全原则,使工业机器人被社会广泛接纳。

众所周知,目前与人接触的服务机器人尚未得到普及。服务机器人需要根据具体情况来回避各种危险,这就要求它具有高度的“智能”。目前的问题是如何判断智能的有效性,换言之,制定它能在多大程度上回避危险的判断标准是一个难点。如果安全界限没有一个通用的判断标准,就无法预先分清避免或减少事故的责任归属问题(依据合同和自身责任使用设备)。下面我们来讨论目前世界范围内应用的75万台工业机器人在安全问题方面残留的普遍问题,希望以此作为制定非隔离的安全型服务机器人安全措施的准备工作的。

4.1 安全规范与规则

4.1.1 安全的基本思路

在ISO/IEC Guide 51中记录了与国际安全规范相关的基本内容。我们在前面提及的

“危险”一词在这个规范中换成了“风险”一词,即安全被定义为“不存在无法承受的风险”。规范规定,“对降低风险,设计者(制造者)比使用者(操作人员)负有优先的义务”。图4.1总结了制造者(设计者)在降低风险时应该优先开展的活动顺序,而后才轮到使用者(操作人员)这一方的责任。

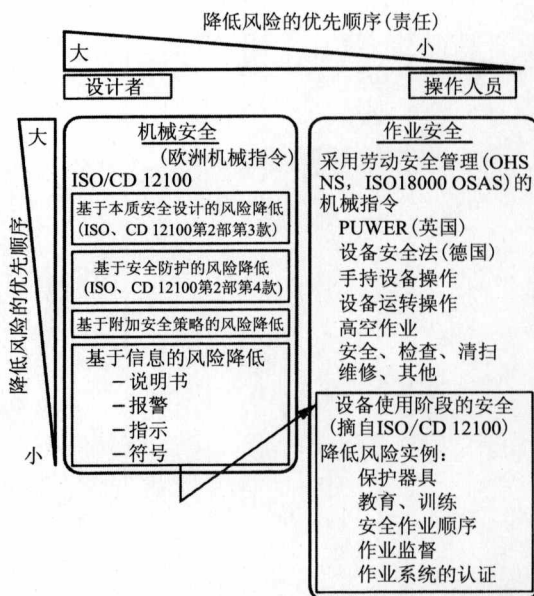


图4.1 设计、制造、使用阶段的安全优先性

图4.1左侧给出了以国际规范ISO/CD 12100(即设备安全的设计原则)为基础的制造者(设计者)安全策略的四大支柱。所谓本质安全设计是指去除不必要的风险部分的设计方法。安全防护则指通过防卫和互锁措施,对必要的和无法消除的风险部分谋求防止事故发生的对策。附加安全策略是指对于存有事故隐患的作业,把异常停止操作授权操作者来实施。最后,对于用上述三种方法都无法避免的风险性,则应该采用显示、警报、准备操作说明书等措施。

一般说来,机器人的功率越大,它的体积和工作空间也越大,利用各种复杂动作满足

多种作业的能力也就越强,但是反过来,它的风险性也与能力成正比。实际上,工业机器人造成的死亡事故主要发生在人直接操作手臂示教的时候,或者手工作业与机器人生产线混杂的场合。此时不仅需要改进机器人在技术方面的对策,更重要的是在导入机器人阶段就应该积极引入安全检查制度,健全劳动安全卫生的综合管理系统(OHSMS),如操作人员的教育训练等。

在建立劳动安全卫生管理系统时,必须注意安全的优先顺序问题,图4.1在确保安全方面提倡制造者优先(即设计者优先)的原则。迄今人们一直认为设备事故的第一原因是操作失误,设计者(制造者)在安全方面负有亡羊补牢的责任。国际安全规范纠正了这种看法,强烈要求设计者要预见操作人员可能会产生的各种失误,在设计阶段就要防患于未然。至于劳动安全卫生管理系统的责任,则是针对设计阶段无法杜绝的风险而采取适当的安全管理措施。

4.1.2 安全确认原则与失效保护

传统上的所谓安全,是通过确认进行认定的。风险设备也是经过安全确认后才被放准运行的,人们称之为安全确认原则。迄今为止,安全确认机制存在的问题是:有些正在运行着的危险设备,从概率的角度判断却往往不存在危险,而有些通过安全确认后投入运转着的设备,又可能因为被认定会发生危险而被迫停止运行。也就是说,依靠危险检测决定是否停止设备运转的方法来确认是否安全,这个原则有不合理之处。

图4.2给出一个采取互锁方法的安全确认系统结构。图4.2(a)的系统属于危险检测互锁机制,即一旦检测出危险即刻让设备停止运转。其缺点是如果故障造成的危险无法被检测出来,那么设备就不会停止。图4.2(b)的系统属于安全确认互锁机制,即只有在确认安全之后才允许设备运转。在后一种情况下,只要发生的故障无法确认它安全,就让设备停止运转。这种安全确认互锁系统发生故障当然也是不可避免的,不过至少不会引起危险故障(指它发生后设备无法停止的故障)。可见,安全确认互锁机制能够遵循安全确认的原则。

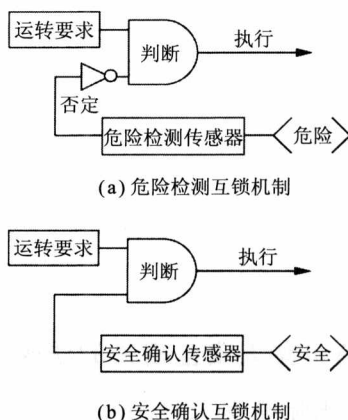


图 4.2 安全确认系统的两种方法
(风险检测机制和安全确认机制)

最基本的安全确认互锁机制是在设备的周围设置电子安全栅栏系统,通过安全开关检测门禁的开闭状态。在机器人作业现场经常见到的安全防护形式是在应该防护的部位用光电传感器检测人员的进出情况,再通过互锁机制控制设备的启停。表4.1表示了两种光电传感器的故障模式。表4.1(a)为反射式光电传感器,它通常处于不接收光线的状态,一旦有人进入,发射器发出的光线经人体反射回接收器。这种装置被称为危险检测互锁装置。如果传感器发生故障,例如,发射器不再发光,于是也就无法检测人员是否进入危险区,而且即使发生危险也无法停机。表4.1(b)为对射式光电传感器,在无人状态下接收器始终接收光线,再下达允许运转的信号。一旦有人员进入挡住了光线,接收器即发出停止信号,而且发生故障时,例如,发光器不发光时,接收器也发出停止信号使设备停止运转。

表 4.1 光电式传感器的故障模式

	(a) 反射式	(b) 对射式
装置形态		
接收器输出	on: 有人 off: 无人 (安全)	on: 无人 (安全) off: 有人
故障时	接收器输出 off (危险侧故障)	接收器输出 off (安全侧故障)

用于安全确认的传感器可以按照“危险”传送信号(能量)和“安全”传送信号分为两种基本类型。二者的差别在于前者包含危险一侧的故障,而后者不包含。安全确认原则要求所构建的系统不受来自危险一侧的错误影响。

在日本,安全确认原则被视为设备控制的基本要求,1998年原日本劳动省颁布了多项机床控制的失效保护准则,其中也包括工业机器人内在的。

4.2 与机器人安全相关的法规

4.2.1 国际规范(ISO/IEC)

有关设备安全的国际规范发展得很快,位于该规范体系最上层的是A规范(即“安全基本原则”),接下来是“通用事项、通用技术”,又分为B₁规范和B₂规范,最下层为C规范(设备的个别规范)。对于个别设备来说,安全法规应该在B₁、B₂规范的基础上制定,它们在确保安全规范的基本内容上是相同的,除了各自的特色外应该尽量保持通用。图4.3为描述设备安全的分层结构。

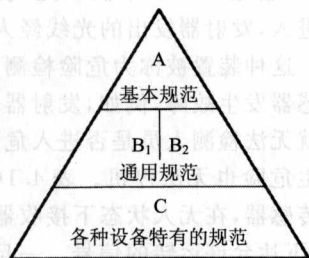


图 4.3 国际安全规范的分层结构

工业机器人安全规范属于C规范的范畴,在ISO 10218(Manipulating Industrial Robot Safety)中有规定,其基本内容与一般设备的安全规范并无二致,即以隔离安全原则和停止安全原则为基础。这对应于ISO/CD 12100(A规范)中规定的设备设计原则,与一般自动设备的类似,详细规定了为了确保自动运行安全必须设置安全栅栏、安全门等互锁装置和安全装置,以及示教时对使能控制的要求等。手臂是机器人的危险可动部分,它在安全方面的考虑与具有危险可动部分的一般设备,如冲床、NC机床等没有什么区别。2002年,我们身边的机器人,如护理或看护机器人等都没有设置安全栅栏,从国际规范体

系角度进行观察,显然它们几乎都无法确保安全。因此,国际规范今后应该开展有关与人共存的机器人的安全体系的讨论,日本也应该积极参与其中。

4.2.2 日本与机器人相关的法规

日本在发生了由机器人引起死亡的事故之后,立即于1983年在世界上率先对劳动安全卫生规则进行了补充,增加了工业机器人相关条款,从法律上规定了采取安全对策的义务。同时,发布了有关工业机器人在使用等方面与安全准则有关的技术指南。

如上所述,1998年日本公布了有关机床控制机构失效保护的指南,日本国内确保工业机器人安全的行政方面的流程也基本遵循这个指南。2001年6月,日本进一步制定和颁布了包括机械在内的安全基准指南,至此,过去一直对工业机器人单独适用的安全确保规范,被归纳成一部适合一般机械的通用安全规范。

JIS B 8433《工业机器人安全性》是ISO 10218的日本翻版,该规范的制定在日本机器人产业界起到了非常重要的作用。

4.3 具体的应对方法

4.3.1 劳动安全卫生规范

图4.4为日本劳动安全卫生规范中与机器人相关的内容。在自动运转过程中,任何形式的进入都是禁止的,只有在无法避免的场合,例如,需要手动运转或检查等,才允许人进入栅栏,而这种进入的前提是人必须事先接受过特别的安全教育。

工业机器人现场最常用的安全装置是用栅栏、门、安全门栓等构成互锁装置,除非把门打开,否则人无法接近机器人。设计上规定,不拔出安全门栓,门就不会自动打开,若拔出安全门栓,则动力源就被切断。但是后来颁布的ISO/DIS 14120警告说,安全门栓并不是十分可靠的安全装置,因为门栓的结构过于简单,弯曲的一根金属丝就能替代安全门栓而可以违规进行作业。直到2002年开发出具有短波保护的安全门栓后,才使国际规范开始允许这种不易失效的安全门栓投入使用。

下面说明指示灯的功能。当出现异常情

况或紧急情况,要求人工采取紧急处理措施时,红色指示灯被点亮;反之,绿色指示灯被点亮表示运转处于正常状态。按照传统的习惯,在设备运转状态下点亮红色指示灯以提醒危险的存在,当设备停止运行时则点亮绿色指示灯以示安全。现在的方法正好相反,出现异常时,设备停止运行请求人工干预,机器人点亮红灯的作用是防止人员接近(危险),只有经过安全确认允许继续运转时,表示安全的绿色指示灯才被点亮。

4.3.2 安全防护的具体方法

现在,不仅工业机器人的安全,连机械设备的安

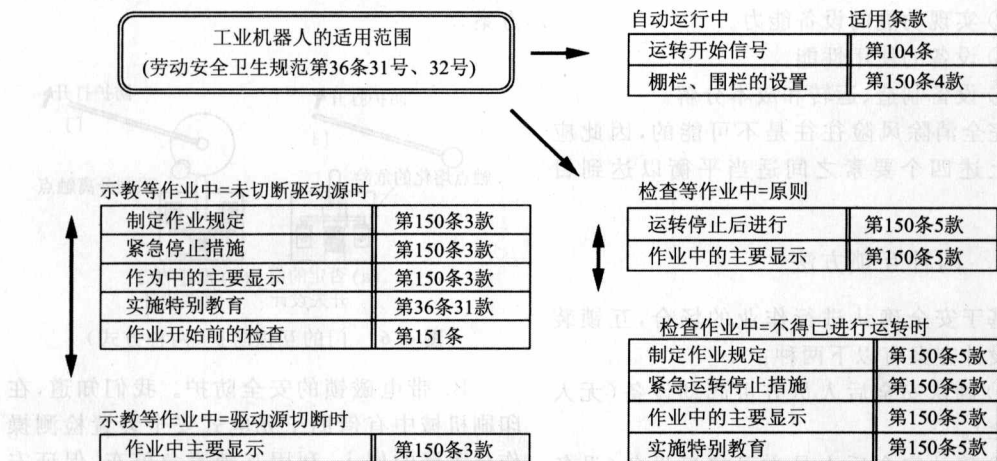
全也出现了国际统一的倾向。在这里,我们参考有关工业机器人的具体安全对策的国际规范 ISO/CD 12100 加以说明。

在国际规范中,设备的危险性可以借助于风险评估的方法进行明晰。通过风险评估,弄清楚风险所在,从而设法降低风险性。

风险评估的基本步骤如图 4.5 所示。这个过程需要反复进行,即在最大限度地运用相关技术的基础上不断重复这个过程。

基本步骤如下:

- ① 预先设想设备的使用状况。
- ② 认定危险源(以及危险状态和危险现象)。
- ③ 估计各种特定危险源(及危险状态、危险现象)的风险。



具体内容在技术指南公示13号(与工业机器人等安全基准相关的技术指南(1983年9月1日))中给出

图 4.4 劳动安全卫生规范规定中有关工业机器人的安全对策

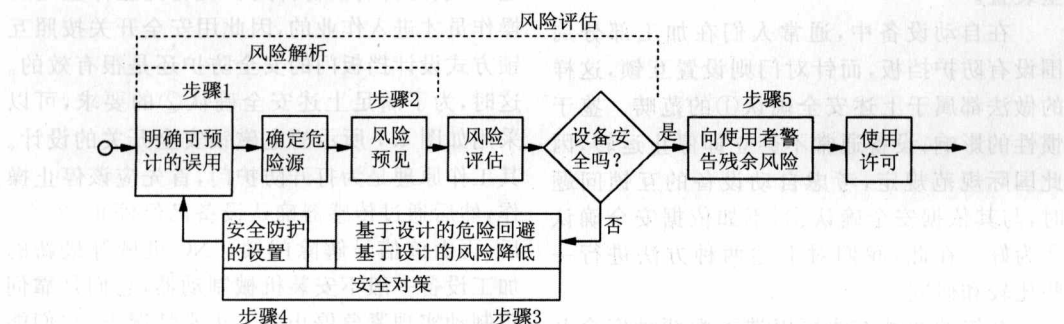


图 4.5 风险评估与安全对策的步骤(ISO/CD 12100)

④ 确定降低风险的必要性。

⑤ 从基本安全设计着手排除或降低危险源。

⑥ 若基本安全设计无法排除或降低危险源,则谋求通过增加安全防护物和(或)防护措施使风险性降低。

⑦ 向操作者警示和通告设备所残余的风险。

风险可以从危害的严重程度和引起危害的概率这两个要素的组合来估计。风险估计后应该以此为基础划分风险的种类。

按照上述程序评估风险的时候,应该以确保设备安全为第一优先,同时兼顾设备能力、使用性能、成本等方面。优先等级大致如下:

- ① 设备寿命的安全性。
- ② 实现功能的设备能力。
- ③ 设备的使用性能。
- ④ 设备制造、运转和成本分解。

完全消除风险往往是不可能的,因此应该在上述四个要素之间适当平衡以达到目标。

4.3.3 两种互锁方法

基于安全确认进行作业的场所,互锁装置的设计方案有以下两种:

① 确认安全后人员方可起动设备(无人则安全)。

② 确认安全后人员方可接近设备(设备停止则安全)。

无论是①、②的哪种情况,安全确认都是针对设备进行的,因此所使用的装置都是安全装置。

在自动设备中,通常人们在加工部分周围设有防护挡板,而针对门则设置互锁,这样的做法都属于上述安全确认①的范畴。鉴于惯性的影响,设备通常不会立即停止运转,因此国际规范规定,考虑自动设备的互锁问题时,与其依据安全确认①,不如依据安全确认②为好。在此,我们对上述两种方法进行一些比较和研究。

互锁的两种方法可以选下面两种安全开关,它们分别对应于上述安全确认的①和②,各自有下面的A、B两种安全开关使用方法。

A. 强制分离安全开关。说到安全开关

的使用方法,常见的如在门上安装限位开关,门打开的时候对应于输入 off 信号,禁止设备运转。这看起来似乎很简单,但是在门打开时状态也可能会错误地发出 on 信号,所以实际上这样简单的设计是不合理的。门被打开,输出 off 信号后,为了能够紧急停车,一般应该有制动器配合使用。

图 4.6(a)所示的限位开关在长期使用后可能会出现触点熔化、复位弹簧卡死等各种问题,总之即使门开启也可能不输出闭合信号(on 信号),所以国际规范不推荐这样的设计。进一步说,即使没有可靠性问题,人们从基本的安全思维出发一直就不大接受这个方案。如果打算对其进行改进,可以选择图 4.6(b)所示的结构,即在门打开时让强制触点分离,这是得到国际规范认可的安全开关设计方案。

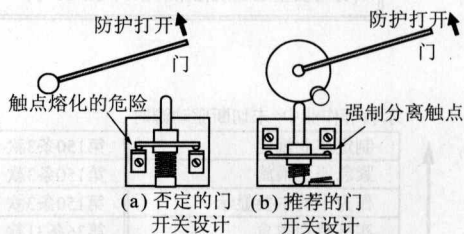


图 4.6 门的互锁防护(两种方式)

B. 带电磁锁的安全防护。我们知道,在印刷机械中有借助于光电式安全装置检测操作员手臂的侵入,利用互锁紧急停车,保证安全的应用实例(安全确认①)。不过人手的速度相当快,在手与机械碰撞之前让设备停止运转的要求往往过高,很难保证正确执行。不过,一般的自动设备都是在设备完全停止之后操作员才进入作业的,因此用安全开关按照互锁方式设计挡板门的安全防护还是很有效的。这时,为了满足上述安全确认②的要求,可以采用如图 4.7 所示的电磁锁安全开关的设计。其工作原理是为打开防护门,首先应该停止操作,然后通过传感器确认设备已经停止(安全)后,再由该信号解除门锁。NC 机械等最新的加工设备一般不安装机械制动器,它们是靠伺服制动实现紧急停止的。正常情况下,它们能够显示优良的停止功能,不过一旦出现故障,就未必能实现制动的功能。总之,对一般的机械电子设备,电磁锁安全开关防护互锁装置仍

应作为标准加以采用。

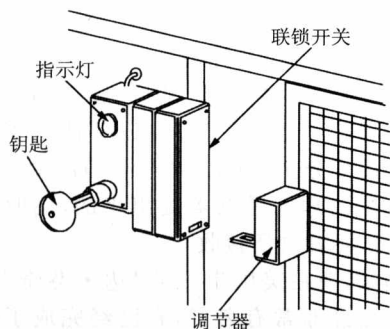


图 4.7 带电磁锁的可动防护开关
(根据旋转停止确认信号来解除锁)

C. 手动运转的使能监视。工业机器人的示教属于一种带有危险的操作,而设备的调整、清理、故障处理等通常也总是需要手动解决问题。几乎所有事故都是在这种非正常的作业状态下发生的。

进入手动运行时,防护互锁装置通常处于无效的状态,此时可以利用下面给出的一些办法,在一旦出现危险情况时,操作员很容易下达停止设备运行的命令。

① 点动式按钮。即只有操作员按住按钮才能进入操作,一旦脱离就停止的功能。工业机器人的示教盒几乎都采用这种操作方式。

② 使能装置。该装置的按钮不直接操纵设备运转,仅属于一种手动开关。只有在它被连续按动期间才允许设备运转。

在国际规范中,不仅要求工业机器人连手动操作设备在内,都要求边操作急停开关,边按住上面所说的点动按钮才能进入手动操作。

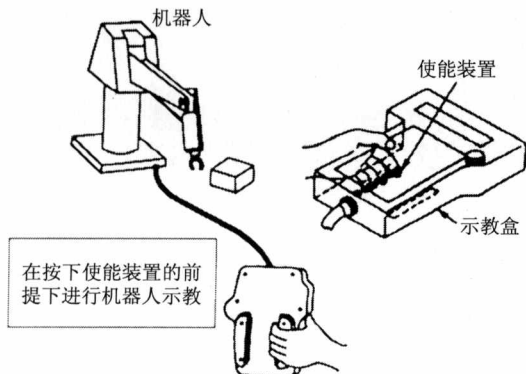


图 4.8 机器人示数使能装置

美国规范中特别明确规定,“机器人示教盒必须带有使能装置,其作用是只有在开关处于连续保持给定位置的状态下机器人才能进行动作”(图 4.8)。

使能装置上的开关有 3 个位置,也就是说,手脱离开关或施压过大,开关都会离开给定位置输出 off 信号让机器人停止运行。考虑到人在紧急状态下有时可能会松手,有时也可能会紧握手柄,因此将操作装置设成 3 个位置,而且让中间位置与给定位置对应。使能装置的设计还应参考人机工程学的知识(图 4.9)。



图 4.9 设备常用的使能操作装置

③ 安全运转速度控制。使能装置可以被视为是一种人工安全确认系统。但是如果机器人的速度很快,那么尽管人感觉到了危险,也很难防止事故发生。因此,为了让使能装置的安全确保功能充分发挥作用,还应该限定设备运转时的安全运转速度。ISO 10218 规范规定机器人手臂前端的最高速度为 250mm/s。

④ 控制软件。安全确保原则中有一个条件,就是重要的地方不允许软件介入。例如,主电源开关就不允许通过软件来接通。紧急停止电路的任务是切断动力源,它是处理故障的最后手段,在故障即将引发危险时必须果断地切断动力源。因此,紧急停止电路应该直接与动力源用接线相连接,以便保证发生故障时能够可靠地切断动力源。

关于控制系统,在安全确保方面也有许多具体的规定。人们认识到,向已经通过安全确认、允许设备运转的系统中引入计算机并非是一件易事,其原因在于计算机本身往往包含危险一侧的故障。不过自 20 世纪末以来,国际规范(特别是 IEC)引入了基于计算机的多种冗余系统,谋求以无危险一侧故障的 PLC(可编程序控制器)构成安全判断(第 4

种)的高可靠性。虽然安全系统的计算机化刚刚起步,但如果计算机能够得到安全方面的认可,再随着安全总线系统的引入,安全系统的构建必将变得更加容易起来。

4.4 今后的课题

在刚刚步入 21 世纪的今天,与人共存的服务机器人尚未得到普及。要想让服务机器人根据环境做出相应的动作反应的确需要所谓的“智能”,不过需要智能的更充分的理由是满足“安全”的要求。迄今为止,在现实中运行的服务机器人仅限于宠物机器人、清扫机器人(未携带危险的手臂)、小型教育机器人等。然而,机器人再小,它的活动手臂也存在损伤幼儿眼睛等的潜在危险,手臂一旦配备了电机就不再是单纯的玩具了。为老年人服务的福利机器人与人类共存于同一个空间内,它的大小近似人类,有可能的话它最好类似双足步行机器人。但是它有跌倒的危险,由此又会引发事故和纠纷。这样推论起来面向社会出售拟人机器人恐怕并不是一件简单的事情。

事故必然与责任相关联。如果所有的事 故责任都很严重,那么纵然机器人有诸多优点也无法实用化。如果我们拘泥于上述种种

有关安全的消极思路,服务机器人就很难走上实用之路。换一个角度来说,社会所应该承担的责任是什么呢?通常的做法是确定应该做的事情之后,首先去实行,然后去进行认证,剩余的危险性(残留风险)属于用户自己应付的责任。也就是说,在设备使用中由设计者和用户分担(以契约的形式)风险。这种关于安全的理念是欧美提出来的,同时正在逐渐被国际社会所接收。

例如,现在美国生产的“达·芬奇”手术机器人已经非常有名了,它已经完成了超过 600 例手术,而事实上是靠医生与技术员一起操作机器人使手术获得成功的。医院并没有承诺手术一定成功,不过患者期待机器人手术有高的成功概率,愿意自己承担剩余的风险责任。欧美社会持有一种源于契约文化的传统思维,就是如果患者认可设备的优点,他就认可豁免医生的事故责任。日本的文化是反其道的、一味从结果追究责任的文化。如果日本不想让自己最先进的服务机器人研究沦为画饼充饥,那么必须做的事情就是在日本吸收和推行欧美国家关于安全规范的制度,即在引入新技术时用户也勇于承担自身的安全责任。

杉本 旭 池田博康

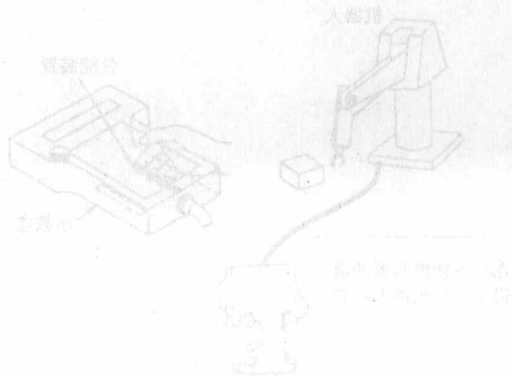


図 4.4.1 ロボットアームの構成図

第 8 篇 机器人 应用系统

Robotics Handbook

第1章 机器人在非制造业领域中的应用

1.1 第一产业

1.1.1 农业机器人

农业包括多道作业,涉及耕耘、整地、收割、加工、运输等各个环节,而且农业作业的对象涵盖农作物、动物、土、水、肥料、农药、杂草、作物的废弃物、农家肥和各种农用物资等。拖拉机和联合收割机的使用使农业的有些领域实现了机械化,但更多的农活仍然需要手工操作,农业机器人研究的目的是用机器人替代这些手工劳动,实现自动化作业。

按照作业类型划分,农业机器人可以分为采摘、防治、除草、移栽、嫁接、插枝、上盆、剪羊毛、挤奶,以及植物生物工程组织培养等多个领域^[1~3]。此外,为了应对季节性的农作物生产,也有人在研究可用于蔬菜移栽、除草、收割的多功能机器人^[4]。虽然研究中的农业机器人种类繁多,但目前进入实用阶段的农业机器人仅限于嫁接、上盆、挤奶等领域。

农业机器人的研究领域有很多分支,甚至涉及拖拉机和插秧机的无人驾驶技术,而且有些人正在研究相关问题。不过,本书主要以配备了机械手和末端执行器的机器人为对象加以介绍。

1. 采摘机器人

在农业机器人的研究中,有关采摘机器人的课题非常多,如采摘橙子、温州蜜橘、葡萄、夏橘、苹果、桃、西瓜、香瓜、西红柿、圣女果、黄瓜、草莓、茄子、甘蓝、莴苣、菠菜等机器人的研究。

就果实采摘而言,作物种类和栽培形式不同,以及枝叶和棚架的障碍,使采摘变得十分困难,有时果实甚至深藏在枝叶的后面,根本看不见。对于这些方面的研究,近年来主要从三个方面着手:从品种改良和栽培方式改进入手,解决作物果实如何适应机器人化的研究;通过作物三维图像的处理开展障碍

辨识和回避研究;从各种角度搜索被遮挡果实的研究等。

1) 草莓采摘机器人

草莓采摘机器人的研究内容有:①草莓生长在植株外侧(土垄的斜面一侧)的栽培;②草莓生长在两行植株之间的栽培;③高位栽培。

佐藤等研究的草莓栽培机器人^[5]以第①种栽培方式为研究对象,其采用的方法是从草莓植株根部到土垄两侧和斜面铺设地膜,使草莓在地膜上生长以便于采摘。采摘时,安装在机器人上的地膜升降器将地膜连同草莓一同升起,用彩色摄像头提取红色图像辨认果实获得果实的位置。

第②种栽培方式是使果实分布在土垄上较平整的地方。近藤等研制的机器人先用摄像头辨识果实,然后将其吸入末端执行器中,再切断果实的柄部完成采摘^[6]。永田等也开展过第②种栽培方式的采摘机器人研究^[7],其特点是为了不损伤果实,机器人抓取果实的柄部,用小刀切断后再采摘。这样,图像处理的任务既要识别果实的位置,又要识别果实的朝向。

有马等进行了高位栽培草莓采摘机器人(图1.1)的研究^[8]。所谓草莓的高位栽培就是将草莓置于约1m高的棚架上栽培,利用摄像头进行颜色识别,区分出适合采摘的果实,然后利用抽吸式末端执行器采摘。

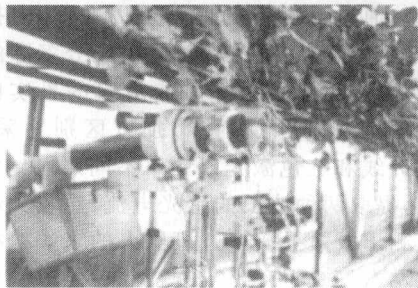


图1.1 高架栽培的草莓采摘机器人(冈山大学)

因为是采用高位栽培方式进行栽培的,所以若手工采摘则不需要弯腰,若机器人采摘则因为果实生长集中、茎叶等障碍物离果实较远,能为机器人采摘提供方便。

2) 黄瓜采摘机器人

黄瓜的叶子宽大,因此在现有的栽培方式下,多数黄瓜都隐藏在叶子背后难以辨认。有人开展了如图 1.2 所示的斜棚式栽培方式的研究,以适应黄瓜采摘机器人作业。该方式将传统垂直生长的瓜苗改为倾斜生长,利用果实的自重将果实和茎叶自动分开。未成熟黄瓜的颜色与叶子的颜色相近,将波长 550nm 的可见光图像和波长 850nm 的近红外线图像输入计算机,利用分光反射特性将果实与茎叶分离。机器人的末端执行器包括抓取部分和检测切断部分,采摘时先通过抓取部分抓住果实上部约 3cm 处,再利用检测切断部分辨认瓜蒂并切断它。

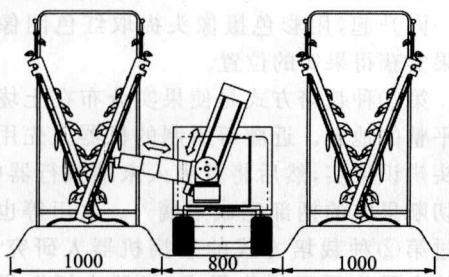


图 1.2 黄瓜采摘机器人

3) 圣女果(小西红柿)采摘机器人

有人采用三维视觉传感器辨识果实和障碍物的位置,研制了能够避障采摘果实的圣女果采摘机器人^[10]。图 1.3 为一个三维视觉传感器的光学系统结构,利用常温滤波器将波长 830nm 的近红外线和波长 685nm 的红色激光束叠加后扫描,通过 PSD 接收目标反射光。通过反射镜的摆动可以在 2s 内扫描 120×120 像素,根据反射红色成分多寡的原理(富含叶绿素的叶子和未成熟的果实比成熟果实红色成分反射少)加以区别并采摘。近红外线和红色激光以频率不同照射到对象物上,提取两种波长的感光电流,比较大小即可检测出成熟果实来。机器人的末端执行器采取左右摆动的结构形式,靠三维图像处理可实现避障采摘。

如果能将三维视觉传感器小型化,将其

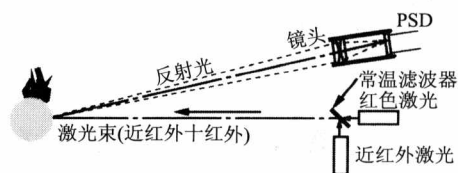


图 1.3 双波长三维视觉传感器

集成到机械手的前端(图 1.4),就不仅可以实现前方扫描,而且能探入茎叶缝隙间进行扫描,采摘隐藏在茎叶背后的果实^[11]。例如,可以先在前方扫描,然后探入茎叶缝隙间,再向尽可能大的空间搜索。在实验条件下的研究报道证实,暴露于叶子表面和隐藏在叶子背面的果实均可以找到。不过,在生产大棚现场的实验中发现,内侧的果实很难采摘,有时连果柄一起被摘下来,可见末端执行器还有待改进。

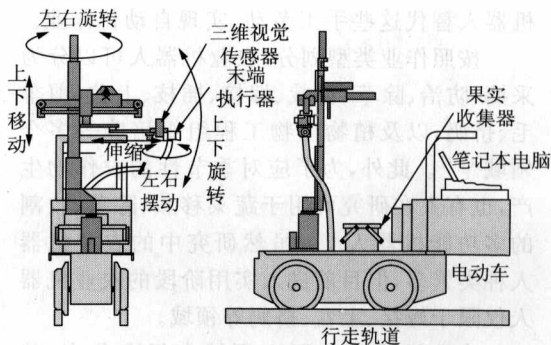


图 1.4 圣女果采摘机器人

4) 结球蔬菜选摘机器人

图 1.5 为丁等研制的茼蒿选摘机器人^[12]。机器人利用多棱镜自土壤上方进行激光束扫描,从而获得茼蒿的三维图像,确定结球的位置和大小。如果茼蒿已经足够大,就再让末端执行器手指(装有力觉传感器)挤压对象以测定其硬度,确定硬度足够后即可采摘。这模仿了人工采摘目测后用手指挤压的方法。由于三维图像是从上方获得的,无法看到茼蒿的根部,故采摘时应该让末端执行器沿结球部的侧面下落测量地面的高度,并以此为基础确定切断的高度。

日本农业水产省农业研究中心(现在的日本中央农研)曾经研制过甘蓝选摘机器人^[13]。该机器人采用彩色摄像头辨识甘蓝,基于神经网络的二值化处理方法提取结球部分,然后将两幅甘蓝模型样本彼此对照推测

结球部分的二维位置和球径。机械手为极坐标型结构,末端执行器由一对抓取甘蓝的手指和一对与之正交的切断手指构成。为避免切不断或过切,抓取手指和切断刀刃处都安装有微动开关,用来检测抓取手指的前端是否已经接触到甘蓝,或者刀刃前端是否接触到地面。

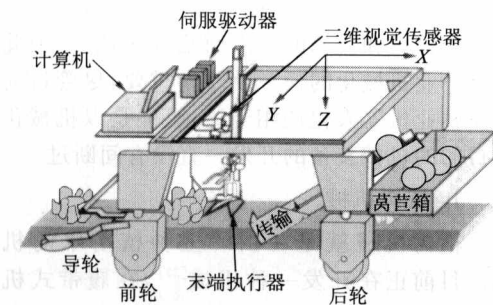


图 1.5 结球莴苣采摘机器人

2. 育苗机器人

近年来,蔬菜、花卉的育苗技术有了长足的进步,育苗容器也改进成为单株育苗盒(即按照植株将苗坑分隔的单独育苗容器)。现在大多数农户从农协或育苗业专业户处购入秧苗,或者从各地的育苗中心购入秧苗。这样有利于农户有效地利用设施和时间。育苗中心必须在短时期内培育大量秧苗,以达到节省劳动力的目的。

育苗机器人的研究主要涉及组织培养、上盆、插枝、嫁接、间苗作业等。

在组织培养方面主要开展了兰科植物标准化移栽机器人、甘蔗培养育苗机器人的研究^[1,14]。

所谓上盆就是将育苗盒育成的秧苗转移至较大的塑料盆中进行栽培的过程。现在,上盆机器人已经实用化了,它能依靠传感器检测育苗盒中的缺苗情况,实现无缺苗栽种。崔等开展了具有紫罗兰幼苗鉴别功能的上盆机器人研究^[15]。该机器人利用图像处理鉴别花期(1~8期),挑出8期的花苗上盆,因为这时的商品价值最高。

嫁接是将两种不同种类的苗木切断,一种留其根,另一种留其茎,然后将二者结合在一起,待彼此的组织愈合后即成为同一棵幼苗。根一侧称为砧木,叶一侧称为接穗。嫁接的目的在于提高苗木的抗病性、改良品种、

促进生长等。西红柿、茄子、香瓜等品种的砧木可以选择其他品种的西红柿、茄子或香瓜,而西瓜、黄瓜则多以南瓜和葫芦等为砧木。最早开展嫁接机器人开发研究的是铃木等^[16],目前日本国内已经有好几家公司出售这样的机器人^[17]。

嫁接方法有好几种,如单叶切断嫁接法(在一棵植株的叶和生长点处斜切作为砧木,将另一棵植株的胚轴(茎)斜切成接穗进行结合)、斜切嫁接法(将接穗和砧木的茎部斜切后再结合)、平切法(将砧木和接穗均水平切断后再进行结合)、插入法等。

图 1.6 给出采用嫁接夹的斜切嫁接法^[18]的例子。分别在育苗盒中培育砧木和接穗,用传送带将它们依次运送到处理区,在这里嫁接夹夹持住胚轴靠根的一侧。由于植株的胚轴有时会倾斜,而且苗木的高矮也不一致,因此机器人应该先将苗木的叶子向上顺直,把苗木扶正,依靠光传感器检测第一片叶子的高度之后用嫁接夹夹持胚轴的上部,使胚轴处于上、下两处被夹持的状态,再用刀片将其斜向切断。被切去根部一侧的接穗保持胚轴上部被嫁接夹夹持的状态,它被送至砧木一侧,压入带有嫁接夹的砧木中,完成嫁接的过程。

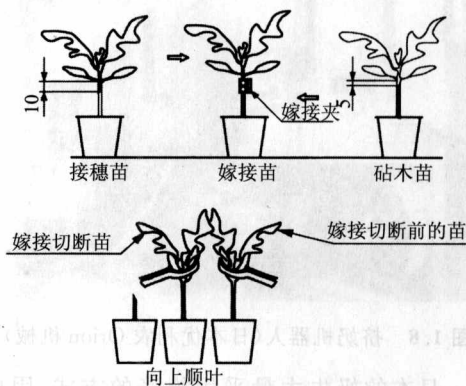


图 1.6 嫁接(斜切嫁接)

嫁接苗木健康生长的基本保证是接穗和砧木之间养分和水分能够顺利贯通。为此,西浦等开发了基于插入法的嫁接机器人^[19]。其方法如图 1.7 所示,将接穗削成圆锥状,砧木削成空心圆锥状,然后对准轴心进行对接。这种嫁接方法的优点是不用嫁接夹接穗和砧木也能紧密地结合。



图 1.7 嫁接(插入法)

3. 挤奶机器人

挤奶机器人仍然沿用传统挤奶机(milk-er)的一套操作方法,即在奶牛的4个乳头上吸附圆筒状的吸盘,然后利用真空泵产生负压,周期性地反复抽吸奶水。

挤奶机器人的研究起始于日本^[20],随后在荷兰制造出实用化的产品,目前在日本该机器人也实现了商品化(图 1.8)。到目前为止,实用的挤奶机器人都是以圈养奶牛为作业对象的。奶牛食用饲料时会自动地移向机器人,奶牛到位后挤奶机器人即可开始挤奶。整个过程包括计算机对奶牛的感知、乳头洗涤、吸盘对接、牛奶质量和数量的检测、吸盘脱离、乳头消毒等一系列作业和数据进行管理^[21]。乳头的检测可以借助于超声波、激光、光遮断传感器等多种方式,然后靠机械手将吸盘吸附到被检测出的乳头上。

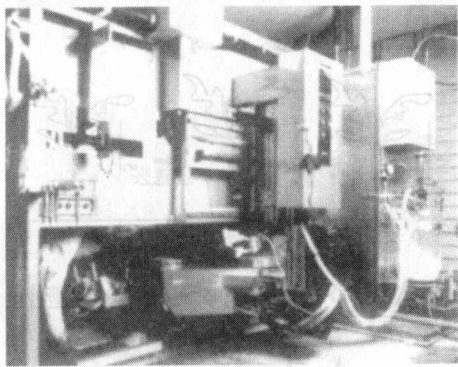


图 1.8 挤奶机器人(日本优利农 Orion 机械)

日本的奶牛大量采用拴养的方式,因此也针对这种饲牛方式开展了挤奶机器人的研究^[20,22]。如果是拴养的奶牛,只需将机器人移向奶牛即可进行挤奶。乳头检测和通过机械手安装吸盘等动作与圈养方式的机器人的动作相同,只是拴养时需要有固定牛身体或随牛身体左右晃动的床鞍,而且床鞍应该和挤奶单元联动。

藤浦建史

1.1.2 林业机器人

日本的森林大多处于地势险峻的山丘,为了进行造林和砍伐必须出入崇山峻岭,可见开发在如此严酷的环境中移动的设备困难很多,这也是林业机器人化(机械化)进展缓慢的主要原因。

相反地,由于在如此严酷的自然地理条件下从事植树和伐木的工人面临许多危险,因此推进林业机械化的任务就非常重要,尽管目前距离林业机器人化还相当遥远,但是以机械化为目的的机械装备的开发一直没有间断过。

1. 植树机械

植树机械就是在山岭上种植苗木的机械。目前正在开发一种机械^[23],在履带式机器车体(base machine)上搭载两台幼苗作业机(图 1.9)。操作员先让作业部分接触地面,按动启动按钮,掘进钻随即挖掘植苗坑,并将苗木放入坑中,再将土压住,自动地完成这一套植树操作动作。苗木则被置于机器车体的中央部位,由操作员手工将苗木放置到作业部分。苗木适合的高度不应超过 1m。这样的设备除能种植针叶树苗外还可以种植阔叶树苗,机器车体的爬坡度为 25°。

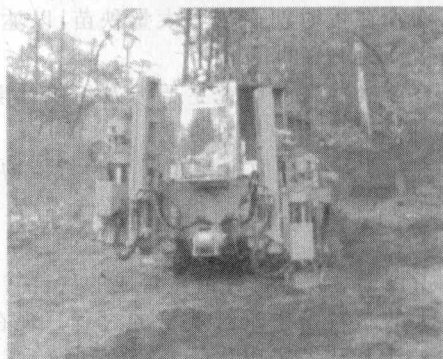


图 1.9 植树机械(林业机械化协会)

2. 割草机械

为了培植苗木必须将苗木周围茂盛的杂草割除(割草),割草作业量最大的时期正值盛夏,是林业工人最为繁重的劳动。因此,当前林业领域最期待的机械是割草机械。

割草作业本身靠甩刀割草机(割草机)就能应付了,可是在种植苗木的林地(造林地)设备应该能够便利作业,因此开发时必须设

法提高设备本身在坡面上的行走能力。

在这样的设计理念下,人们相继开发了以下几种机型:6足步行机型(图1.10)^[24],母机置于斜坡上带动子机在坡面上行走的机型^[25],在斜坡上能够控制和保持车体姿态水平的机型^[26],行走能力更强的轮履式车体机型^[27],将3组行走装置连接在一起以全方位移动式倾斜不平整地面行走车辆^[28](TTM: Tri Truck Mover)作为车体的机型(图1.11)。

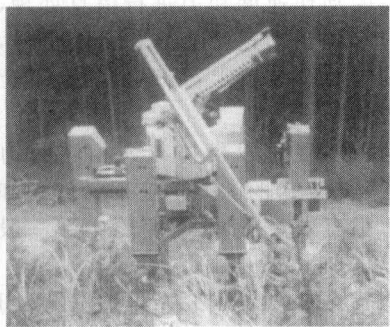


图 1.10 割草机械(6足步行型)
(林业机械化协会)



图 1.11 割草机械(TTM)(林业机械化协会)

3. 除枝机械

无节木材一向很受日本建筑业的欢迎。生产无节原木必须在苗木未成材前去除其枝桠,去除的高度通常为根部以上4~8m,传统的都是由工人爬上树用斧子或锯进行作业,十分费力。

目前在市场上已经有动力式自动除枝机械出售,不过该设备比较笨重,工人虽然省去了爬树的辛苦,却必须携带设备在山坡上行走,然后把它安装在树干上进行作业,劳动强度仍然很大。因此,有人开发了自动行走除枝机^[29](图1.12)。它被搭载在车体上运送,到达作业目标树后用车体本身搭载的机械臂

将它卸下来,它就能自动上升到设定高度执行除枝作业,作业完成后再自动下降到起点位置。不过,这些除枝机械依靠行走装置绕树干旋转产生上升运动,通过链锯切断树枝,工作效率并不算高。为此,人们又开发出一种将斧状刀刃缠绕在树干上的卷曲刀具,随着它的升降运动,快速地去除枝桠,作业效率极高。



图 1.12 除枝机械(林业机械化协会)

4. 伐木机械、制材机械^[30]

为了生产木材,就必须将直立的树木伐倒(伐木),去除枝桠,将其切断成3m或4m等指定长度的原木。这些工作原本是由伐木工靠链锯来完成的。但是在砍伐中,因为树木过高、过长,其倾倒的朝向往往出乎意料,砍伐后在制材过程中,又往往会出现树干转动、滑落事故,所以这是林业生产中最为危险的工作。

目前,开发的伐木机械有多种,如装有电铲(excavator),安装在专用车体上的伐倒/制材机械等。进行伐倒作业时,作业机械抱住树干的根部,用链锯将其伐倒。进行制材作业时,则水平抓住伐倒的木材,从根部至尖部逐渐送入树木并去除树枝,测量长度,当到达指定长度后自动停车,用链锯将原木切断(圆切)。

伐集机(fellerbuncher)能够同时完成伐倒作业和伐倒木材的堆积作业。伐制机(harvester)能够连续完成伐倒、制材工序。仅能制材的机械称为制材机(processor)(图1.13)。国际上已经开发出技术非常先进的伐制机,操作员只需要设法将机械锁住指定的树木,伐制机即可利用计算机按照最高价值原则确定自动完成伐木和制材的数据。但是,日本的树木常常曲直不均,需要非常细致

地对待制材,因此尚未采用自动制材技术。目前,在全日本制材机还属于最普及的机械,它为提高林业生产效率和保障劳动者安全作出了很大的贡献(图 1.14)。

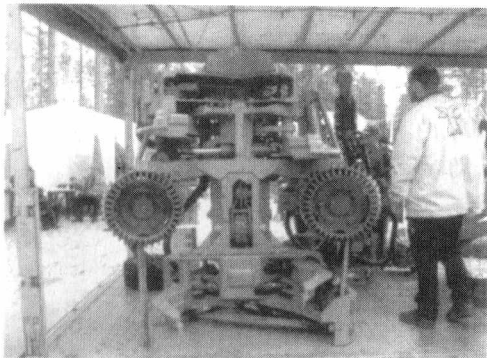


图 1.13 伐制机(林业机械化协会)



图 1.14 制材机(作业中)(林业机械化协会)

内山研史

1.1.3 水产机器人

本节从渔船渔业、增殖业和养殖业的角度简单地介绍机器人在水产业中的应用,同时从海洋中移动物体控制的角度介绍一下渔船的航行方法。

1. 渔船渔业

渔业的重点在捕捞。捕捞分两大类:一类是使用渔网;另一类是使用钓鱼渔具。

目前的渔业环境比较差,具体表现为劳动力不足,工资、运费居高不下,所以渔业在节省人力、节省能源上的呼声很高。当前的趋势是在渔网捕捞方面实现自动化或系统化,以便代替人的传统操作,提高捕获量。下面以鳊鱼钓鱼机和墨鱼钓鱼机为例说明钓鱼机械的机器人化概况。

1) 自动钓鳊鱼装置

这是一台附有微型计算机的自动钓鳊鱼装置,钓绳的末端连接一个负荷传感器。鱼钩、鱼体质量以及鱼咬饵力的强弱都可以通过钓绳传至负荷传感器,引起输出电信号的变化。此外,该装置还带有测量船身微小横摇角度的倾斜仪和鱼竿角度的姿态传感器。该自动装置的特点是能将鱼竿角度换算成时间和测量负荷值的函数,再借助于控制电路对鱼竿的动作速度和力进行信息处理,算出鱼竿应有的驱动速度信号和力矩信号,并将其加在电驱动装置上,最终目的是不让上钩的鱼脱钩。

这种装置可以模仿与人相同的钓鱼动作,将其安放在船舱中部,它对钓鳊鱼和长须金枪鱼很有效。在过去,船舱中部一般没有渔工,鱼的捕获量也很低。

该装置的主要规格为:可钓重量为 1.5~15kg,最快钓取周期约为 7s,电源是 200V,单相,频率为 60Hz,消耗电力约 4kV·A(高峰时约 10kV·A)。该装置本体重约 46kg,标准配置为 5 台,控制柜重约为 21kg,遥控器重约 1.5kg,打印机重约 3kg,倾斜仪重约 1kg。

该装置可以分为下面六个基本动作:

① 放竿。根据海面的各种具体作业条件,由计算机控制按图 1.15 所示的顺序完成一系列放竿动作。

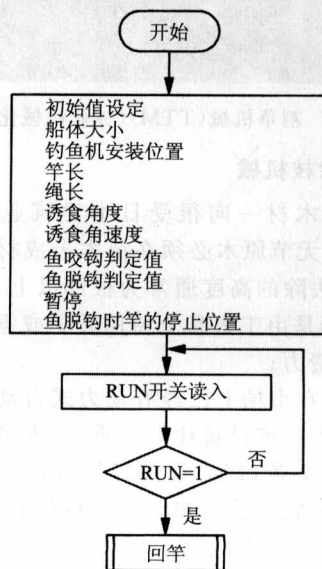


图 1.15 放竿动作的流程图

② 诱食。所谓诱食是指拨动鱼竿使其沿水面缓缓漂动,以及周期性地把鱼钩向船体收放之类引诱鱼群咬饵的一连串动作。诱食动作还应该计入竿的上下沉浮动作以及船体横摇(由倾斜仪测出)的影响,以模拟正弦曲线。

③ 检测。鱼一旦咬钩(形似鱼饵的钓钩),它的嘴便被挂上,接下去应该立即收竿。感知鱼是否上钩的原理是在天蚕丝的一端系上钓钩,另一端通过竿的内孔与钓机前端的负荷传感器连接。负荷传感器感知鱼体的质量并与初始值比较得出是否应当收竿的决定。

④ 收竿。把竿拉到正前方,再一次测量鱼的质量。该装置不但能够根据鱼体的质量自动调节收竿速度,而且能顾及船体航行速度的影响,因此在收竿时可以保持鱼体位置相对于船体几乎不变。

⑤ 摘钩。把鱼从钓钩上摘下来的动作称为摘钩。当竿回升到设定角度后,收竿动作即暂时停止。此时钓绳回松,鱼会在本能的趋使下张口而自动脱钩,为确保鱼脱钩应该多次反复上述动作。为了避免个别鱼体仍然滞留在钓钩上,这时渔竿自动向舱内倾倒,靠人把鱼摘下来,再靠人完成下述回竿动作。

⑥ 回竿。将空竿回放到海面,重复动作②,诱鱼上钩。

2) 自动钓墨鱼机器人

钓墨鱼的方法通常是把许多枚形似鱼饵的钓钩以 40~75cm 的间距挂在钓绳上。钓绳做上下沉浮的运动以引诱墨鱼抱住钓钩。浮动的动作是引诱墨鱼上钩所需要的,被称为“抖动”。

为了增加墨鱼的捕获量,传统上一直依靠渔工来观察海况、潮流、鱼态和环境变化等因素,极细微地调节手的“抖动”,诱鱼上钩。事实上,这种依靠手工作业的方式捕获量有限,所以才开发出钓鱼机械,由机械来完成上述的一套动作,既节省人力,减轻了劳动强度,又可以提高捕获量。特别是近年来,渔业经济环境恶化,科学技术进展迅速,制造这种近似完成渔工“抖动”动作的机器人化的墨鱼自动钓鱼机械既有必要又有了可能。

在这里介绍一种自动钓墨鱼机器人,其构造如图 1.16 所示,它由四大部分组成:缠卷前端坠有重物的缠绳轮、缠绳轮驱动装置、带有微机的速度控制装置、缠绳轮转角测量装置。

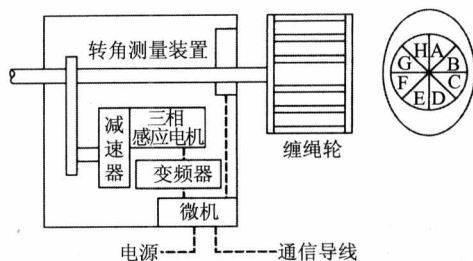


图 1.16 钓墨鱼机器人的结构简图

该机器人的简单运转模式如图 1.17 所示。

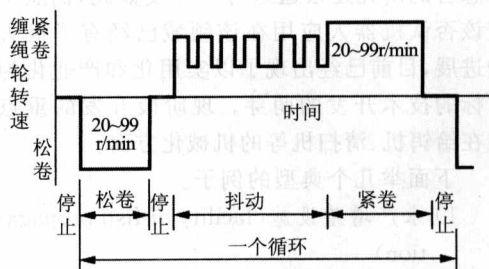


图 1.17 钓墨鱼机器人的运转模式

该装置的动作原理大致为:对应于缠绳轮每一圈,转角测量装置分为八个等区间(A~H),每通过一个区间(45°)旋转编码器发出角度位置信号,每转过 360°又发回一整圈的信号。在“抖动”过程中,缠绳轮通过各个区间的角速度实际是不等的,故应该以旋转编码器的位置信号与通过该区间的时间相比求得各个区间的平均转数信号,然后将八种转数数据送入微机存储器中记录下来。

缠绳轮驱动电机为通用鼠笼型三相感应电机,并配有变频器以实现速度控制。电机可以做到按事先设定好的通过各个区间的时间来驱动缠绳轮轴。因此,作业时只要从存储器中读出上面所记录的平均转数信号(频率信号)送到变频器就可以使缠绳轮的转动近似模拟熟练渔工的“抖动”动作。对机器人的操作十分方便,利用它操作盘上的输入键可以自由设定各个区间的转动信号,以及紧卷速度、松卷速度、力矩、水深、抖动时间等参数。

在现场使用时,总是多台机械沿着渔船的两舷一字排开,为了能迅速处理运转模式等一系列指令,需要借助于船载主计算机,并通过通信导线与所有的钓鱼机构一一连接。这样,有关机群全部运转、机群部分运转及有关抖动等的指令便能迅速地传至所希望开动

的那一部分或全部钓鱼机。

佐藤 要 酒井久治

2. 增殖业和养殖业

实际上,在水产增殖业和养殖业中引入机器人以达到节省劳动力、节省能源目的的工作才刚刚起步。起步晚的原因除了增殖业和养殖业的历史尚短之外,还由于人们对所涉及的水产物在生理、生态与环境的关系知之甚少,相当于机器人五官的、用于生物饲养的传感器尚未开发出来,以及对饲养人而言极关键的第六感官的研究还很遥远等。即便如此,仍然不应该否认机器人应用在该领域已经有了极大的进展,目前已经出现了以实用化和产业化为目标的技術开发的萌芽。现阶段开发的重点放在给饵机、清扫机等机械化方面。

下面举几个典型的例子。

1) 水产增殖设施(facility of fish propagation)

日本国家栽培渔业协会和县一级行政区划的栽培渔业中心,近40年来在水产种苗(已经具备成体条件的,被放流或放生到天然

水域成活的幼仔被称为种苗)的大量生产技术方面取得了显著成绩。他们总计用水槽培养棘鬚鱼和比目鱼约百万尾,对虾约1亿只,鲍鱼等约100万个。他们在种苗生产过程的自动化、省力化方面也做了不少努力。图1.18给出了鱼类种苗的生产过程^[31]。图1.18中,在阳光与氮、磷肥料的合成作用下培养小球藻供海水臂尾轮虫生长,后者又是种苗发育前期的饲料。后期,饲料改用混合饲料和鱼类、贝类的肉泥。生产系统中还包括放养母鱼的水槽,一旦估计母鱼卵已成熟便立即诱发其产卵,并把卵集中起来转入饲育水槽中进行培养,长到大约3cm长时即成为种苗。目前,水产繁殖业的一些传统手工劳动正在改成高效自动作业。例如,根据种苗的发育情况定期开动水泵适量更换水槽中的海水,用空气阀或空气补给方式造成水槽内的铅垂循环水流,补充溶解在水中的氧气,进行水质(水温、盐分、pH值等因素)的监测等。图1.19为养殖水槽海水循环装置,图1.20为海水臂尾轮虫饵料浓缩装置的一个实例^[32,33]。

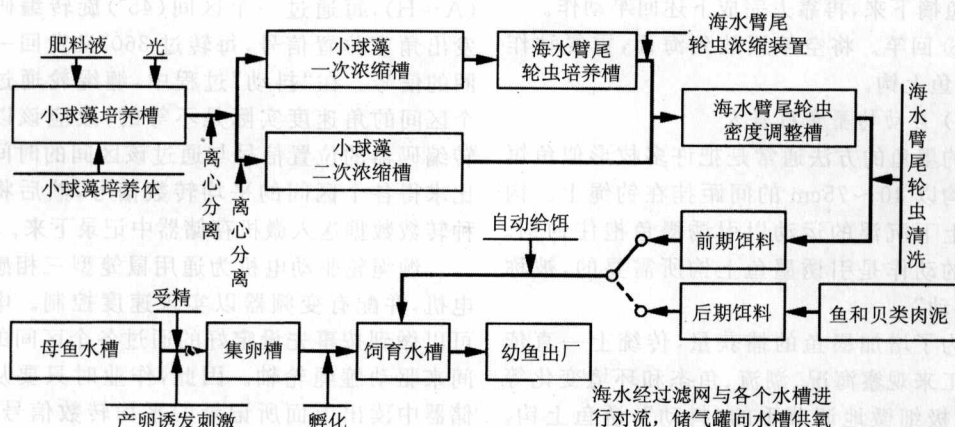


图 1.18 鱼类种苗生产过程图

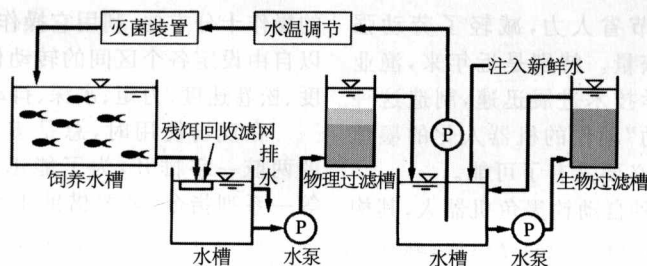


图 1.19 养殖水槽海水循环装置(小浜栽培中心)^[32]

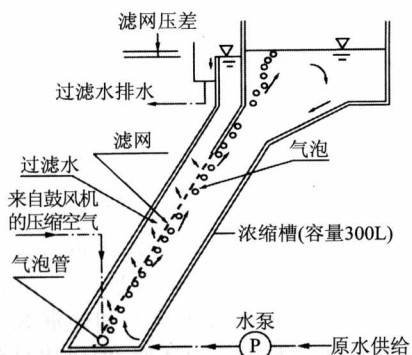


图 1.20 海水臂尾轮虫饵料浓缩装置概念图(玉野栽培中心)^[33]

为了推进上述生产系统的自动化,需要引进控制机构。为此,生物信息的反馈、传感器开发等课题亟待研究探索。

2) 水产养殖设施(facility of fish culture)

水产养殖包括鱼类、贝类、海藻三个方面。鱼类养殖又可以划分成池养、网箱养两类。设备开发集中在自动给饵机和设施清扫机方面,主要目的是节省人力。鱼饵一般为鱼、贝类肉泥等混合饵料,利用料斗、传送皮带、水槽等进行投饵。另外,保持水质和底层环境的清洁也是很重要的。这一部分工作可以借助于设施清扫设备。设施清扫设备按作业内容又分为海水交换设施(水槽和水池的水质管理)、供氧设施(搅动池水补充水中的氧气)、池底清扫设施等。图 1.21 为一种常用的养殖池。池的上部沿半径方向布设水管用来给水,水喷出后推动池水形成定向环流。排水口在底部中心处,因为残饵和其他沉积物一般都集中在环流的中心。若水槽很深,可以用空气阀或空气补给方式形成上下循环

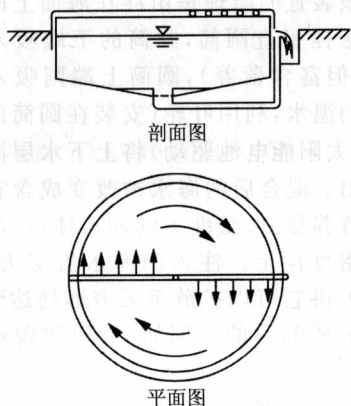


图 1.21 圆形养殖池

水流,以增加水中氧的含量,减少沉积。图 1.22 为池底清扫机器人的例子,它是一种自行走机器人,在运动过程中撞墙后即改变方向,随机地进行自行移动,沉积物由吸嘴抽吸经由管道排出池外。电源为电压 DC12V,耐压 10m 水深的密封电源组。池水的排空有专用水泵(AC100V),或者利用水槽水位的虹吸作用。人们对排水方法也进行了深入的研究,以保证饲养生物不会随污水一起被放泄掉^[34]。

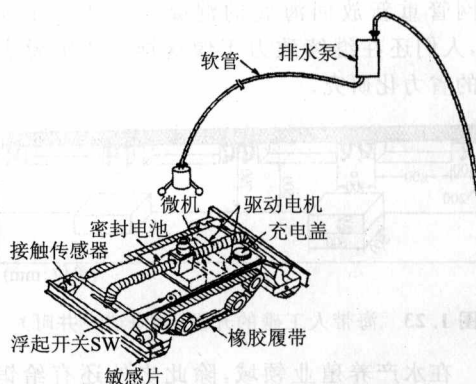


图 1.22 池底清扫机器人
(717mm×400mm×239mm)

网箱养殖的容器呈圆形或方形,网材为金属网或化纤网。金属网箱用来寄养大鱼,化纤网箱则寄养小鱼、未成鱼和幼鱼。由于在网上往往容易寄生硅藻、海藻以及其他微生物,不但恶化了网内外海水的交换条件,而且容易成为鱼病菌和肌体幼虫栖息的着床,所以网面需要进行定期清扫甚至更换。一种称为自动洗网机的机器人或机械便应运而生。通常,洗网有海水喷射式和擦除式两种方式,也可以把网运到岸上进行冲洗,或者就在海水中进行冲洗。为了防止网面被污染,目前正在开展无公害防污涂料、防污型网箱的开发研究。

贝类养殖用到一种名叫下垂链的养殖绳,它的上端挂在浮子或筏上,下面悬挂附着贝类用的基床、笼子等。例如,养殖牡蛎的下垂链以扇贝壳为附着基,植入牡蛎种后沿绳子每隔数十厘米的间距进行分布。扇贝、鲍鱼则放在笼子里沉入海水中养殖。鲍鱼的饵料是海带等大型海藻。养殖贝类的下垂链也需要经常清扫。清扫时需要把下垂链提到海

上作业台面上,用海水喷射、擦除,甚至短时间浸泡在热水中以除去附着在养殖贝表面的寄生物。

海藻养殖主要是指养殖海带和裙带菜。其方法为拖绳式或投放海藻附着基床。图 1.23 给出养殖海带的一个例子^[35]。具体做法是在海底砂床上安放若干个混凝土台,台上捆扎用挤塑法制成的塑料网管。海带就生长在这些基床上。收获时用起重船将塑料网管吊到作业船舱内运回陆地,收摘完将塑料网管重新放回海底的混凝土台上。事实上,人们还在继续致力于像这样一类海藻养殖的省力化研究。

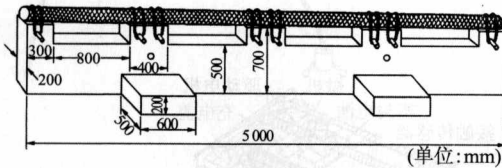


图 1.23 海带人工礁的开发(北海道户井町)

在水产养殖业领域,除此之外还有给饵机器人、水质管理系统、鱼量计数器、养殖鱼捕获系统等的应用。另外,在其后续的水产加工领域,各种自动加工机械的省力化和自动化也都有了长足的进步^[36]。

3) 生产渔场设施(facility of artificial fish habitat)

这是一种围捕和收获水产生物的设施,有人工鱼礁、人造海滨等。它们是鱼及鱼以外的如虾、章鱼等水生物的栖息、休息、觅食的高密度生息场所。日本在沿海渔场设施开发方面投入了相当的力量,人工礁渔场和人造海滨渔场便是成果之一。

高知县水产试验场的土佐黑潮牧场系统位于高知县的海面上,是为鲷鱼、黄肌金枪鱼、鲱鳕等表层洄游鱼类的聚集和捕获而设置的 12 座钢制大型浮鱼礁。其中的 3 座搭载了海洋气象观测设备,可以利用县级防灾部门的无线电通信网络为海洋渔业中心收集海况信息,并通过电话应答通报装置及时把海况信息提供给渔工,以达到合理作业和防止海难的目的。

人工渔场是模仿天然渔场修造的,它的真正意图在于组成一个渔场系统,甚至连围捕计划都包含其中。图 1.24 为一个根据市场行情

进行捕鱼的渔场设施构想方案^[37]。该装置中敷设有粘网和恐吓装置的人工鱼礁,首先布上粘网,然后利用位于海面上的开关盒操纵发出闪光或电刺激来驱赶鱼群。鱼群受到惊吓后在条件反射下采取逃避行为而撞入粘网。调节驱赶信号的发送频率便可以捕获不同种类、不同大小的鲜活鱼类产品。比目鱼通常喜爱聚集在岩礁地带或碎石带间的砂床上,因此就有人在海底的砂地里放置碎石和碎混凝土块构筑类似于比目鱼生活的环境,做成比目鱼捕捞渔场。这种渔场设施,不但可以节省人力,而且可以捕获到高质、鲜活的鱼产品,使渔业从早先的粗放养殖、滥杀滥捕的掠夺型经营发展成一种新的渔业经营形式。

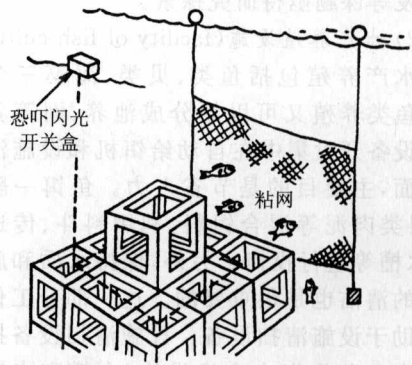


图 1.24 鱼礁渔场的计划捕捞

4) 鱼类栖息环境的改善(improvement of fish habitat environment)

(株)Malinoforum21、日本三重县政府、民间企业三方共同开发了一种水质净化密度流扩散装置,用于混合 20m 水深范围内的上下水层,现在已经在五处海湾分别试用了这种装置。该装置的原理是由浮在海面上的船坞向海下悬挂铅直圆筒,圆筒的下端吸入冷海水(贫氧但富含营养),圆筒上端则吸入含饱和氧气的温水,利用叶轮(安装在圆筒的固定位置,由太阳能电池驱动)将上下水层混合后平稳排出。混合后的海水被改变成含有适量氧气和营养盐分、密度不同的水体,被注入到适合的密度层上。注入的海水流层为势流,从理论上讲它可以扩散至无穷远处达到改善上下层水质的目的。例如,泊间浦曾经一度是赤潮的发源地,经过水质净化密度流扩散装置的改善处理后现在已经成为一个优良的养殖场^[38]。

200m 以下的深海海水具有清洁、低温、富养、成熟等特点。清洁可以减轻鱼类遭受病菌引起疾病的侵袭,简化生物管理和水质管理工作。其低温特性使水温控制简单,减少了夏季高温期对生物的影响。富含营养的特性有利于浮游植物和海藻的培养,以提供富含营养盐分的良好环境。成熟则为通常在表层海水和近岸海水难以培育和生长的鱼类提供了栖息的条件。由此可见,人类不仅有必要掌握产业所需要的大量取水和排水对海洋环境的影响,而且应该推进相关技术的开发,以积极的行动改善鱼类的栖息环境。

2003 年,(株)Malinoforum21、神奈川县政府、民间企业三位一体共同实施了一个项目,在离相模湾平塚冲约 25km、水深约 1000m 的海域锚置了一个名叫“拓海”的海洋肥沃装置。该装置由没入水中的马刺型飘浮体和下方悬挂的升降管道(内径为 1m,用于海洋深层汲水)构成。深层海水被抽吸上来之后经过与表层海水的混合,调整其密度,再释放到富含营养成分的有光层(太阳光能到达的范围)培养浮游植物,构筑新渔场。

在增殖养殖业中,还可以举出借助于海面保育场技术进行资源增殖的例子。

人类各种生产活动排放的水银,已经被证实会对生物产生严重的影响,许多环境激素物质,如 DDT(滴滴涕)、PCB(多氯联苯)、TBT(三丁基锡)等,以及石油类碳化氢等有害物质都给海洋环境带来影响,造成水产业的种种问题,成为一大公害,这越来越凸显出水体环境监测系统的重要性。增殖业和养殖业属于守护自然资源的一种责任,还能在为人类提供安全食物方面作出贡献。为此,人们对机器人的应用抱有大的期望。

中村 充

1.2 在建筑业中的应用

1.2.1 建筑机器人

建筑行业在 20 世纪 80 年代开始了机器人的研究。当时,建筑业投资低迷,迫切需提高劳动生产率,而同一时期的工业机器人恰好处于积极引入的态势,从媒体上经常能看到有关机器人大幅度提高劳动生产率的报道。因此,社会对建筑领域引入机器人给予

了高度的关注,各个建筑公司对推进机器人的应用也持积极的态度。迄今,日本建筑机器人的数量占世界总数的大部分,日本已经成为屈指可数的开发和应用大国。

本节以建筑行业的建筑领域为中心,讲述机器人开发和应用的状况,然后对 21 世纪建筑机器人的发展方向进行展望。

1. 建筑机器人的特点

与制造业的工业机器人相比,建筑机器人在多个方面具有不同的特点,归纳起来如表 1.1 所示。下面集中就:①移动功能;②环境适应功能;③作业功能加以说明。

表 1.1 建筑机器人和工业机器人的特性比较

特 性	建筑机器人	工业机器人
移动功能	作业场所变化 操作对象(材料)既重又大 对象物静止 机器人本体可能需要重构	作业场所固定 操作对象(材料)质量较轻 对象物运动 机器人本体大多固定
环境适应功能	作业内容不确定 作业环境变化 室外环境 材料特性多样 粉尘和振动多	作业内容确定 作业环境无变化 室内环境 材料单一 粉尘和振动少
作业功能	作业种类多 作业复杂 标准化差 运动特性要求不高	作业种类单一 作业单一 标准化好 运动特性精确

1) 移动功能

建筑物与土地有着密切的关系,而且需要将笨重的材料和构件搬运到指定地点。常用的建筑方法是从低层向高层逐渐推进施工作业,作业环境随着工程的进展不断发生变化。应对这种条件的建筑机器人应该具有移动功能,所以不固定是建筑机器人的特征之一,其实不少工业机器人也都不固定。

就移动条件而言,机器人行走的表面包括平整地面、不平整地面(包括光滑面和台阶)、高台、地下等多种情况。为了能满足上述移动条件,建筑机器人的移动装置应该选择轮式、履带式、滚筒式等。

具有移动功能的机器人在安全方面必须格外周密地加以考虑,除了要保证操作员的

安全之外,还必须保证机器人自身的安全。在建筑工地上实现完全无人化作业是相当困难的,机器人和人通常混杂在同一个工作空间内进行作业,因此十分重要的课题是如何利用先进技术,确保机器人对人没有伤害。

此外,还必须考虑机器人与梁柱、墙壁、梁、天花板等的碰撞问题,考虑如何采用障碍检测技术和避障技术,以及避免机器人从地面或外墙的开口处跌落的问题。

2) 环境适应功能

如前面所述,随着建筑工程的推进,机器人的作业环境也在不停地发生变化。建筑机器人通常属于室外作业,伴有到处飞散的水泥灰粉尘、震动等。因此,它必须适应极其恶劣的工作环境,同时又具有极强的适应性。要想适应于不同楼层之间的移动,机器人还必须具有重构功能,因地制宜地变化其尺寸和质量。对于有些机器人还要求其具有室内搬运能力和可拆分运输等能力。

3) 动力源

工业机器人的作业地点大多数是固定的,其动力源以电源为主。建筑机器人需要经常移动和拆卸,如果将电源作为动力源,那么对电缆的处理就会很麻烦,因此通常为其配置内部驱动源,如电池或内燃机等。然而,内部驱动源往往增加了质量和增大了外形尺寸,这与机器人的移动性能是矛盾的。因此,建筑机器人希望有体积小、质量轻、寿命长的

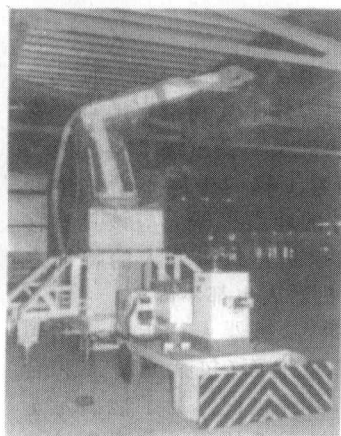
驱动源。

2. 建筑机器人的开发

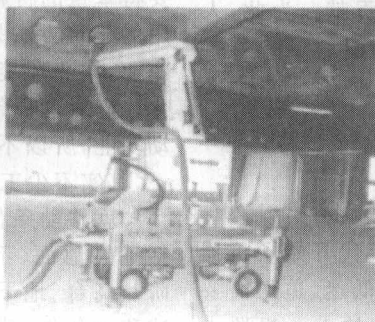
长期以来,建筑机器人的开发都是由建筑工程公司自己包办的。在1983年,最早的建筑机器人用于大楼钢结构构件的防火涂料喷涂(图1.25),那是世界上第一台实用的建筑机器人。它采用市售的工业喷涂机器人,将其搭载在移动车体上,采取自行牵引车移动的方式^[1]。楼内地面敷设感应电缆和供检测停止位置用的钢板,机器人能够在指定工作区间内实现移动和停止控制,完成向钢构件上喷涂耐火材料的作业。机器人的动作是事先直接进行示教的,然后由机械手再现喷涂动作。该机器人后来又陆续开发了2号机、3号机的改进型(图1.25)。

2号机将编码器作为检测行走距离的传感器,并采用数值控制的方法,因此提高了它的定位精度。在功能方面则是增强了喷涂材料的稳定性。3号机的改进之处是把液压驱动换成电气驱动,将原来的分离式控制单元替换成一体式控制器,其结果是大幅度地减小了外形尺寸,达到小型化的目标。机器人的示教方式是1号机和2号机的重要课题,开发了离线示教系统来编制机器人的动作程序^[2]。这个示教系统能大幅度地缩短示教时间。

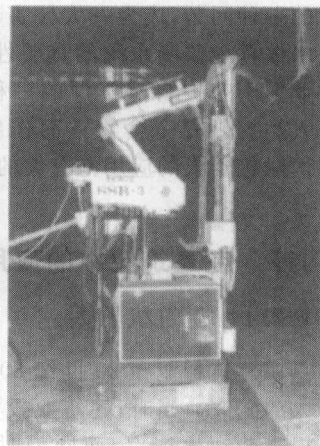
这个实例开创了以建筑工程公司为中心展开建筑机器人开发的先河。



1号机



2号机



3号机

图 1.25 钢构件耐火材料喷涂机器人(清水建设)

例如,后续又出现了在作业现场将混凝土输送至指定地点的分配机器人(图 1.26),抹平混凝土浇注表面、提高平滑性的地面精整机器人。地面精整机器人由四家建筑公司合作开发,图 1.27 为其中的一例。

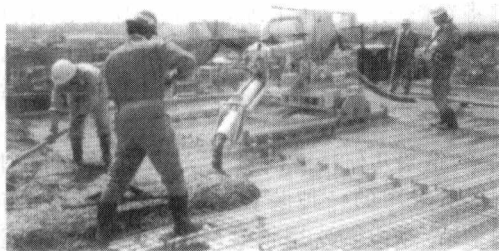


图 1.26 混凝土分配机器人(竹中工务店)

1987 年,当很多建筑机器人还处于开发阶段时,地面精整机器人的 1 号机已经开发成功并且面市了。该机器人无需铺设移动轨道,它的自主导航装置中带有陀螺仪和测距轮,能辨识自身位置,自行调整偏离的路线。它采用滚筒式车轮,可以在尚未固化的混凝土表面上一边行走一边用旋转式慢刀将浇注面抹平^[3]。

根据 1 号机在工程现场的应用结果,对 2 号机进行了改进,采用体积更小的陀螺仪,使机器人本体做得更加轻巧,而且增加了自动避障功能。为了便于在现场对机器人进行重构,将机器人拆分成 4 个模块。实践表明,该机器人的效率是人工的 5 倍。以 2 号机为样机的更轻型的商品已经开始出售。

有关建筑机器人的开发状况,社团法人建筑业协会的“建筑机器人专门委员会”于 1996 年发布了一个调查结果^[5],当时日本总

计开发了约 150 种型号的机器人。以下是这些机器人按工程进行分类的情况。

- ① 与临时工程相关的:22 种。
- ② 与主体工程相关的:55 种。
- ③ 与外部装饰工程相关的:23 种。
- ④ 与内部装饰工程相关的:14 种。
- ⑤ 与设备工程相关的:3 种。
- ⑥ 与防护工程相关的:30 种。
- ⑦ 与拆除工程相关的:3 种。

3. 建筑机器人的应用情况

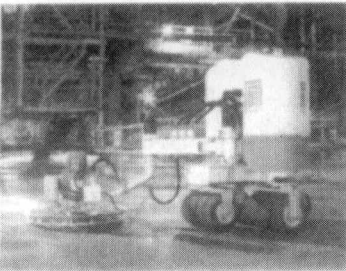
在进行上述调查时,调查人员曾经在该协会的加盟企业选择了 15 家有建筑机器人开发经验的企业,对它们的应用状况进行了统计,回复结果包含了以下 107 种机器人。

- ① 已商品化的机器人:21 种。
- ② 目前在役的机器人:42 种。
- ③ 适合特殊工程的机器人:34 种。
- ④ 正在开发的或在实验阶段的机器人:10 种。

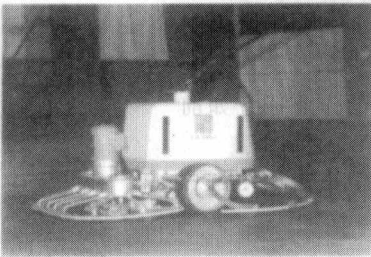
表 1.2 按作业类别给出了 21 种已商品化的机器人的排位情况。

表 1.2 商品化机器人的销售数量排位(前 10 名)

销售数量排位	机器人名称	商品化机种数量 (机种数)
1	自动脱钩装置	1
2	建材搬运机器人	4
3	混凝土地面精整机器人	4
4	吊具回转控制装置	1
5	建材自动搬运系统	3
6	钢架几何精度测量系统	1
7	混凝土布料/匀料装置	3
8	混凝土地面自动打磨装置	1
9	标准打墨线系统	2
10	钢构件焊接机器人	1



1号机



2号机



商品机型

图 1.27 混凝土地面精整机器人(鹿岛建设)

表 1.2 中销售数量最多的机器人是“自动脱钩装置”。图 1.28 给出它的一个例子。作业时,用卷扬机将施工现场的钢架或钢梁吊起并用螺栓暂时固定,然后通过遥控器控制自动脱钩装置将吊具的挂钩从钢构件上解脱^[6]。脱钩作业多为高空作业,工人没有稳固的立足点,因此使用自动脱钩装置既安全又简便,该装置在工程中得到了广泛普及。

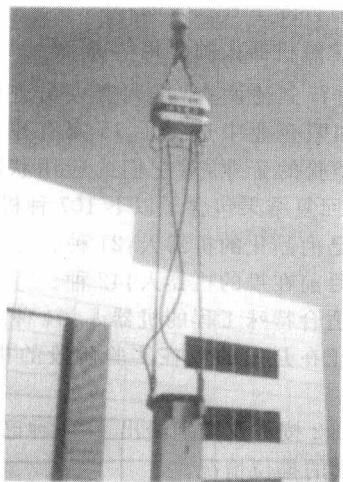


图 1.28 自动脱钩装置(清水建设)

“建材搬运机器人”已经有 4 种商品机型。图 1.29 为其中的一例。该机器人能够水平搬运质量小于 100kg 的建筑材料到达指定位置。其控制方式采用遥控操作^[7]。



图 1.29 建材搬运机器人(鹿岛建设)

混凝土地面平整机器人的作业任务如前面所述。

以上三种作业机器人的销售数量约占总销售数量的 80%。

下面介绍其他的机器人。

我们知道,用卷扬机将大型混凝土或钢架构件起吊至高空并安装在指定位置时,由

于受风力的影响,构件会产生摇摆,因此可以利用“吊具旋转控制装置^[8]”来抑制摇摆,控制构件的姿态以达到安全和正确安装的目的。该装置依靠扇叶(旋转翼)和陀螺仪实施控制^[8]。

建筑使用的内部装饰材料或机械设备等物资被装上卡车运输到工地后,需要用升降机将它们从地面提升到指定的楼层,“建材自动搬运系统”就是进行这种作业的自动装备。目前,不仅有垂直搬运装备,而且有水平搬运的装备。

“钢架几何精度测量系统”是搭建立柱和钢梁所采用的一种装置。装配好立柱,并与钢梁结合后,需要用钢丝绳修正立柱的垂直精度。该系统可以在立柱装配阶段同时进行修正,从而减少了作业时间。该系统由放置在作业现场地面上的激光发生器和安装在立柱上部的标志(感光器)组成,通过与正确位置进行比较提高立柱搭建的几何精度。

现场浇注混凝土的过程是用泵车(生砼车)将混凝土(所谓生混凝土)运到施工现场后,借助“混凝土布料装置”将它们分配(垂直或水平输送)到指定的位置,进而分配到指定作业层面上的指定位置。混凝土浇注地面还必须按照设计图纸的要求高度均匀、水平地进行敷设。

“混凝土匀料装置”(图 1.30)是均匀浇注混凝土层面的装置,它由水平控制部分、匀料部分、行走部分等组成,通过无线遥控使四个行走轮在用槽钢架设的轨道上行走。水平控制的方法是接受激光器传来的光线,根据设计图纸计算出给定的位置和修正量,然后自动完成水平调整。实验表明,用该装置施工得到的混凝土层面的一致性精度能够满足社团法人日本建筑学会规范的要求。

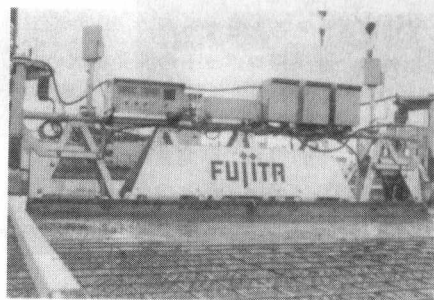


图 1.30 混凝土地面匀料装置(富士田)

此外,目前还有如下几种虽然未达到商品化水平但是成熟度已经较高的建筑机器人:

- ① 外墙喷涂机器人。
- ② 钢构件现场焊接机器人。
- ③ 玻璃装卸机器人。
- ④ 镶天花板机器人。
- ⑤ 外墙瓷砖剥离检测机器人。
- ⑥ 洁净间检查机器人。
- ⑦ 外墙涂层剥离作业机器人。

4. 机器人施工系统

在建筑领域中最有可能以系统的形式将不同用途的多个机器人进行集成应用的作业就是混凝土工程。图 1.31^[9]给出混凝土工程中布料、夯实、匀料、精整等一系列作业用途的机器人。它们就是：①布料装置(混凝土输

送和布料);②夯实系统(浇注立柱和墙面时的混凝土捣固);③匀料装置(浇注混凝土地面时按给定高度均匀布料);④精整机器人(混凝土水平表面的抹平)。

与其他工程相比,该工程的机器人化进程最快,普及率也最高。

5. 楼宇自动施工系统

在 20 世纪 80 年代后期,建筑业界除开展了上述机器人的单机开发以外,还同时进行建筑物整体建造自动化的尝试。从 20 世纪 90 年代初期开始,以高层建筑为对象的自动化施工系统率先在世界上进行应用^[10]。截至 2002 年,8 家建筑工程公司一共开发了 9 种型号的楼宇自动施工系统,实用的例子甚至拓展到海外施工工程,累计达 20 项之多。适合自动化施工的建筑物以钢结构高层建筑为

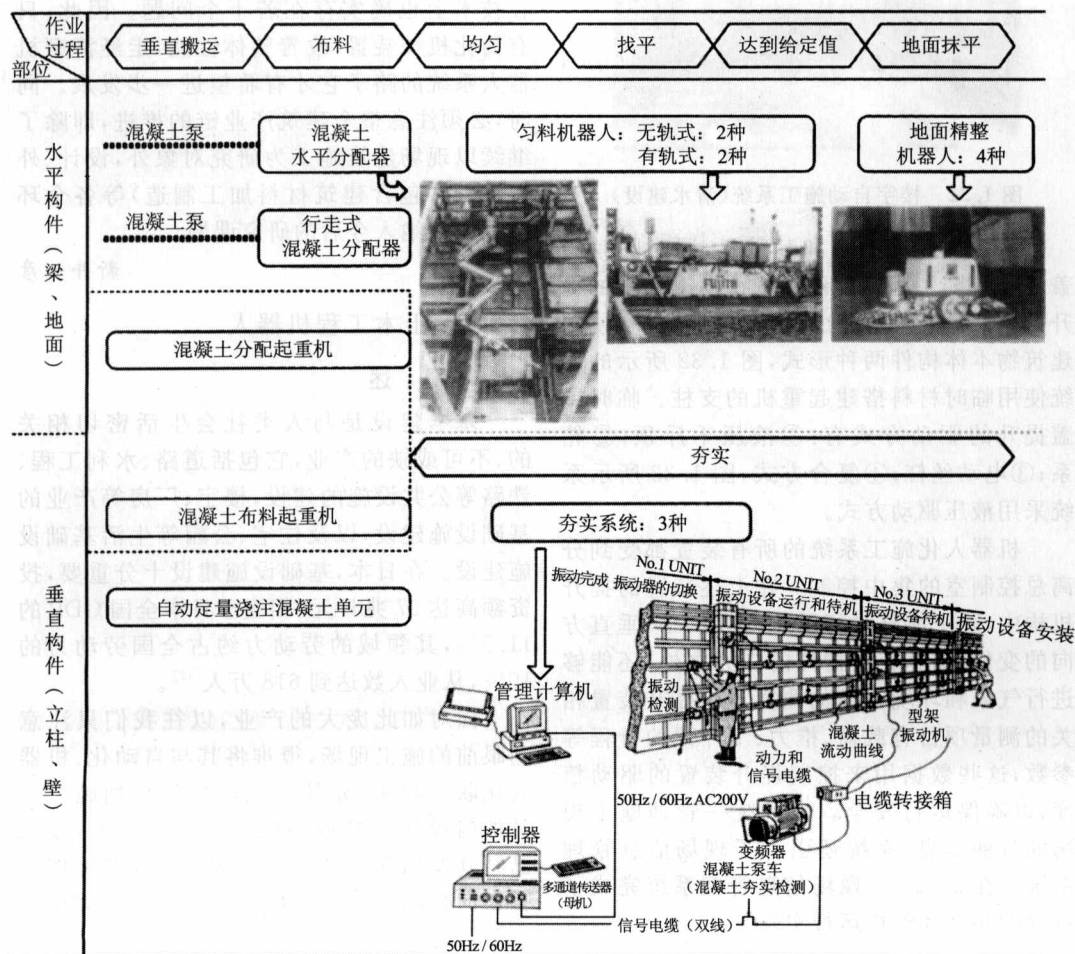


图 1.31 机器人化施工系统举例

主,同时也兼顾钢结构及钢筋混凝土混合结构、钢筋混凝土结构等。这些自动施工系统的类型大致可以分为:①“施工工厂”装置,它包括建材搬运和装配装置;②在地面设置“施工工厂”,建筑物由上而下依次进行施工,又靠其自身依次提升建筑物。作为前一种类型的示例,图 1.32 给出了“施工工厂”的内部结构。“施工工厂”设有临时屋盖,以改善全天候的作业环境。临时屋盖内部装有将立柱和梁等建筑构件搬运到指定位置的设备。它有 3 种构成方式:①水平搬运天车;②天车、垂直搬运设备、卷扬机组合设备;③由载货升降机构成垂直搬运设备及天车横向搬运设备的转运方式。

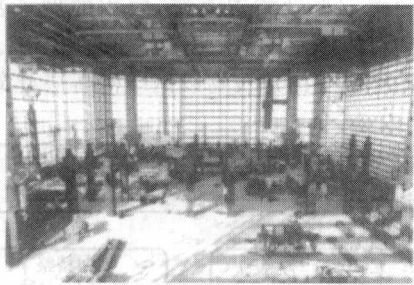


图 1.32 楼宇自动施工系统(清水建设)

该系统配有天车和起重机,同时临时屋盖还配有随工程进度能够依次向上起降的提升机构。提升机构分成使用临时材料和使用建筑物本体构件两种形式,图 1.32 所示的系统使用临时材料搭建起重机的支柱。临时屋盖提升的驱动方式有:①液压千斤顶;②轮系;③电动丝杠;④复合方式,图 1.32 所示系统采用液压驱动方式。

机器人化施工系统的所有装置都受到分离总控制室的集中控制。在上述装置的提升机构中,除了能够进行结构体在水平、垂直方向的变位,测算装配构件的应力之外,还能够进行气象和环境方面的测算。与提升装置相关的测量项目有载荷、推力、千斤顶的行程等参数,这些数据用来控制提升装置的驱动精度,以确保运行安全。为了统一管理施工现场的各种信息,系统还引入了现场信息管理系统。在 2002 年,现场信息管理系统完成了数据的联动和整机运行实验。

6. 展望

本节叙述了建筑领域机器人单机的开发

和应用情况,以及楼宇自动施工系统。下面我们来展望一下它们在 21 世纪的应用前景。

建筑机器人属于专用机器人,其特点是多数都围绕建筑主体和装饰工程而开发,都有特定的作业目标。这些机器人为建筑业节省劳动力和安全保障作出了贡献,但是在经济层面却还存在很多课题,这也是建筑机器人未能普及的重要原因。因此,今后的发展方向主要是如何将多种复杂作业的机器人单机整合为机器人化的系统结构,以及从技术层面开发轻型动力源,并有效采用新的信息技术。

楼宇自动施工系统在改善作业环境、减轻劳动强度、缩短工期等方面都取得了显著的成效,不过它们仍然有待于在实际工程中接受更多的实践检验。经济效益只是楼宇自动施工系统普及的主要障碍之一,除此之外在技术上也确实存在若干问题。因此,只有简化机械装置,改善整体性能,走经济型机器人系统的路子它才有希望进一步发展。同时,必须注意整个建筑产业链的推进,即除了继续以现场建筑施工为研究对象外,设计、外协、采购(包含建筑材料加工制造)等各个环节都应该纳入今后的研究课题。

新井一彦

1.2.2 土木工程机器人

1. 概述

基本建设是与人类社会生活密切相关的、不可或缺的产业,它包括道路、水利工程、铁路等公共设施的建设,楼宇、厂房等产业的基础设施建设,以及住宅、公园等生活基础设施建设。在日本,基础设施建设十分重要,投资额高达 57 兆日元,相当于日本全国 GDP 的 11.5%,其领域的劳动力约占全国劳动力的 10%,从业人数达到 618 万人^[12]。

面对如此庞大的产业,以往我们只注意到眼前的施工现场,很难将其与自动化、机器人化联系起来,充其量也就是联想到施工人员如何操作机械设备的问题。事实上,今天已经开发出多种土木工程机器人,多种作业正在向自动化和无人化的目标推进。其中的一部分已经普及开来,得到广泛的应用。

人们对基本建设行业的机器人的研究由来已久。最早始于 20 世纪 60 年代,是从粉砂

机、液压挖掘机等工程机械的自动化起步的。当时工业机器人正呈现日新月异之势,在提高生产效率、保证安全的目标下迅速取得进展。在日本的泡沫经济时期,劳动力呈现出明显不足的迹象,于是人们开始注意在实际施工中如何节省劳动力的问题,各种机器人被开发出来并投入生产。但是随着泡沫的破灭,低迷的日本经济状态又导致土木工程机器人数量的锐减。业主们以长处不突出、成本过高为理由拒绝使用机器人,机器人的开发工作陷入举步维艰的境地^[13]。

以上简单回顾了土木机器人的发展过程。至于今后土木机器人的发展方向,首先见图 1.33^[12]所示的基本建设行业劳动力供求(不足)关系的变化。由图 1.33 显而易见,基本建设行业劳动力的供求情况受到经济的强烈影响。现在已经不存在劳动力供给不足的现象了,然而只要经济不再继续低迷,再加上将来出生率低和老龄化等问题,可以认为出路仍然应该在通过机器人化和自动化谋求劳动力的节省和生产效率的提高方面。

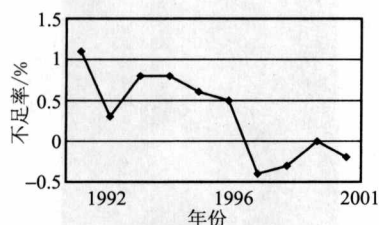


图 1.33 基本建设行业劳动力不足率的变化^[12]

日本土木学会于 1981 年发起了“土木工程机器人座谈会”(现在的土木工程机器人委员会),企图构建日本全国土木工程机器人的研究网络,以推动相关的研究。继土木学会之后,6 个与土木工程机器人有关的团体于 1988 年组建了土木工程机器人研究联络协会。该协会每两年召开一次土木工程机器人专题研讨会,为相关最新研究成果的发表提供了一个讲坛。1994 年,国际土木工程机器人学会成立,国际建设机器人就有了定期的专题研讨会,成为国际间开展研究交流的平台^[14]。

2. 土木工程机器人的特点

在土木工程中所使用的机器人在性能要

求方面与室内环境中的工业机器人有显著区别,这些区别给土木工程机器人的开发和应用带来许多新的课题,下面列举这些课题的要点。

- ① 设计内容依据作业要求而变化,个性化强。
- ② 工件外形尺寸大,机器人经常需要搬运重物。
- ③ 工程现场有移动性。
- ④ 施工现场为多工种混合作业。
- ⑤ 单元作业多,难度大。
- ⑥ 施工现场的信息难以充分地反馈到设计中。

- ⑦ 作业不规范,作业内容不固定。

下面再列举一些工业机器人所没有的、在经营和结构方面的问题。

- ① 基本建设行业的附加值低,设备投资额有限。
- ② 设备开工率低。
- ③ 施工具有较浓厚的承包性质,不容易形成企业自有技术积累。
- ④ 相关企业的机器人开发体制还不健全。

- ⑤ 需要强化企业之间,以及企业与研究或教育单位之间的协作体制。

- ⑥ 如果仅在个别企业单独开发的层面上展开活动,很难形成商业行为环境。

由上述可知,研究、开发、引进土木工程机器人,不光需要解决技术上的问题,还必须并行解决涉及企业经营行为、产业结构等方面的一系列有关问题。必须强调指出,与制造业引进机器人的成功经验相比,在开发和普及土木工程机器人方面需要付出更大的努力。

3. 土木工程机器人的开发应用状况

土木工程机器人是“作为基本建设工程施工专用设备而开发的机器人的总称”^[15]。它大致可以分为对土木施工机械的遥控操纵系统,以及将作业装置、移动装置的全部或部分改造成自动化的系统。目前,有不少土木工程机器人还处在开发和实用阶段。“土木工程机器人自动化技术手册”(财团法人尖端建筑技术中心)所给出的分类方法如表 1.3 所示^[16]。

表 1.3 土木工程机器人的种类^[16]

用途	数量
岩土施工	26
基础施工	36
堤坝	29
隧道	47
盾构	89
铺装工程	30
总计	257

注:建筑、海洋、维护和单元技术除外。

由表 1.3 可知,仅盾构和隧道挖掘两项的土木工程机器人就占到半数。这反映了如果工程作业环境比较严酷,推进机器人化的工作就会比较顺利,也容易普及。

1) 自动控制机器人

自动控制机器人能够根据指定的步骤执行规定作业。例如,建设物资的搬运、安装、拆卸等。机器人能够测量自身的姿态和位置并加以修正。只是从这一类机器人的外观来看,多数与其说是机器人,还不如说是大型自动机械设备。

(1) 盾构机 盾构机是地铁、下水管道等城市地下工程施工的掘进设备。盾构机大多数为圆柱形,其前端的圆形刀盘边旋转边向施工面施压,以完成在岩土中的掘进任务。机器不断地自动向前掘进,刀盘切削下来的碎石土暂时被收集到机器的内部,然后由运输装置送至后方,随即送出隧道。为了防止切削后隧道的塌陷,利用弧形砌块搭建成圆弧拱顶充当隧道的壁面。为了降低劳动强度,提高劳动效率,用搬运机器人来完成安装弧形砌块建材的任务^[17]。盾构机前进所需的液压缸的推进力、推进的方向大多数采用自动控制的方式(图 1.34)。

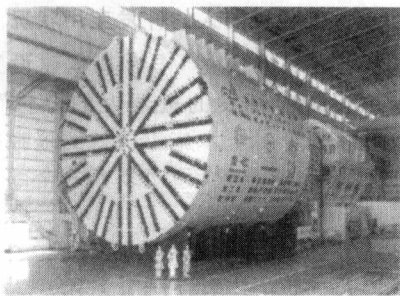


图 1.34 东京湾横穿公路建设中使用的盾构机
(西松建设)

(2) 地下连续壁面施工机械 该装置在挖掘地下墙体时无需开辟作业空间,可以直接在地面上挖掘沟槽,将钢筋插入沟槽中,并浇注混凝土,得到沟槽状的钢筋混凝土壁面。由于壁面是并行(连续)浇制的,该方法应该归属于一体化墙面施工方法。由于是在深沟中进行作业,从地面上无法观察到机械的施工状况,因此大多数机械采用多传感器测量和自动操作控制。

(3) 深基础自动施工机械 深基础为地下圆柱形构造物,过去都是用人工完成的。运走挖掘出的土方,运入建筑材料,所有的这些作业都在地下施工工人的头顶上完成,自始至终存在着安全问题。因此,人们开发了几种无人设备,利用遥控机械从事地下作业。现在它们已经投入到实际应用中(图 1.35)^[18]。

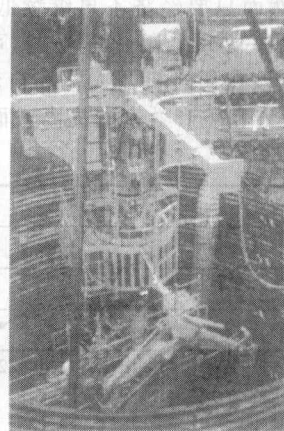


图 1.35 中心式深基础自动施工机械
(大本组)^[18]

(4) 沉箱施工掘进机器人 所谓沉箱施工法是为了在地下建造巨大结构,首先在地面上将结构物造好,然后将其下方的土方挖掉,让结构物慢慢下沉至指定位置,它属于动态施工方法。过去,该方法的难题是如何保证处于巨大结构物下方的施工人员的安全问题。沉箱施工掘进机器人使地下作业实现了无人化。

(5) 喷浆机器人 喷浆机器人是在隧道掘进工程中,将混凝土喷射到挖掘的壁面上形成保护层防止壁面塌陷的机械设备。传统的喷浆作业的问题是浆液回弹(未黏结在壁面上的材料)形成粉尘,作业环境十分恶劣,

同时加剧了浆材的损耗(浆液的回弹量超出给定值)。为了解决上述问题,喷浆作业的自动化和机器人化设备逐渐普及开来。喷浆机器人可用于曲面、折角面的自动喷浆作业(图 1.36),作业时它只要与壁面保持一定的距离,同时慢慢移动机械手并调整喷嘴的角度,达到喷浆厚度均匀一致即可。

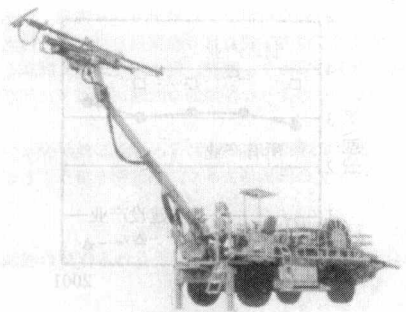


图 1.36 喷浆机器人(TCM)

(6) 桥梁喷涂机器人 桥梁刷漆属于高空作业,不但危险且效率较低。日本本州四国桥梁公团管理着包括世界上最长的明石海峡大桥在内的很多座大跨度桥梁,需要更新涂漆的面积非常大。为了提高工作效率,保证安全性,降低成本,他们开发并应用了桥梁喷涂机器人(图 1.37)^[19]。

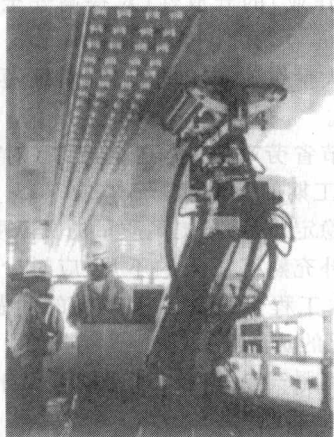


图 1.37 箱形桁架的涂装机器人
(本州四国桥梁公团)

2) 遥控机器人

人员直接进入灾害现场(例如,云仙普贤山的岩浆流现场)是非常危险的。但是,为了防止灾害进一步引发新的危害,有时人们又不得不进入这样的场所进行施工,这就是开

发遥控建筑机械无人化施工技术的背景。在日本,目前已经有多种型号投入了使用^[20]。再就是火山喷发、泥石流突发等自然灾害,虽然它们的发生地点是无法预知的,但是灾害一旦发生就必须紧急应对。总之,对于危险区域内的作业,人们虽然不缺乏技术准备,但是往往因为受灾人员不懂得如何操作而贻误时机。因此,在日本颁布了“突发事件无人化施工手册”(财团法人尖端建设技术中心),给出了应对的程序^[21]。

(1) 无线遥控建筑机械 采用无线遥控的方式操纵(遥控化的)液压挖掘机等建筑机械。这是一种在小规模灾害现场的恢复工程和危险场所作业中能确保驾驶员安全的装备。目前,具有这种功能的建筑机械已经出售多台,得到了普及。

为了使已有的建筑机械也能进行遥控操作,人们还开发了安装在驾驶座旁,能操纵手柄的机械手,以代替驾驶员(图 1.38 和图 1.39)^[22]。

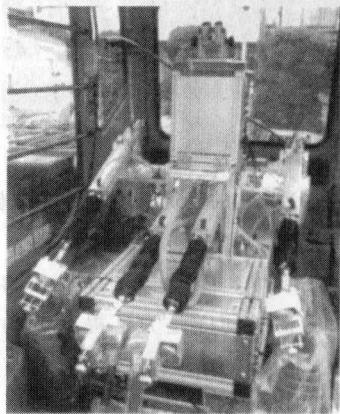


图 1.38 遥控机器人
(国土交通省九州技术事务所,富士田)^[22]



图 1.39 无线遥控建筑机械的操作
(国土交通省九州技术事务所,富士田)^[22]

(2) 无人化岩土工程系统 这是一个施工系统,不仅实现了单台建筑机械的无人操作,而且同时可以操纵多种建筑机械完成复杂施工。例如,用液压挖掘机进行掘进,用辊式翻斗车装卸土石方,用压路机压平路面等各种机械的协调作业。2000年喷发的北海道有珠火山就依靠这种系统实施了减灾工程施工(图1.40和图1.41)^[23]。



图 1.40 遥控室(摄影:长 健次)

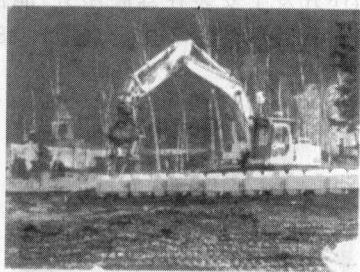


图 1.41 无人化的建筑机械(摄影:长 健次)

4. 今后的课题

与其他产业一样,土木工程行业开发、引入机器人的目的同样是为了提高劳动生产率和降低成本。实际上,近年来土木工程行业的劳动生产率并未得到提高(图1.42),一直处于低迷的状态^[24],这一点是与基本建设行业的自动化水平低,机器人比较落后的现状相对应的。究其原因,当然有多种多样的原因,但主要有如下两点:

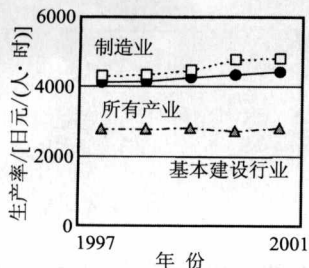


图 1.42 劳动生产率的变化趋势^[24]

① 采用土木工程机器人反而会导致成本增加。

② 适应机器人作业(现场)的环境尚未具备。

图1.43给出了土木工程行业投资状况的趋势。由图1.43可知,与其他产业相比,土木工程行业的投资比例相当低^[24]。

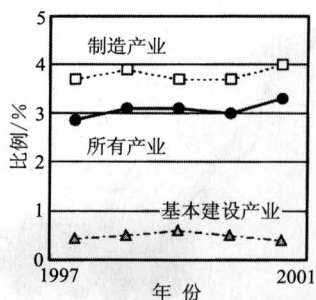


图 1.43 研究费用与销售额比例的变化^[24]

尽管形势十分严峻,但是基本建设行业仍然在谋求新技术的发展。日本土木学会土木工程机器人委员会的报告对以下几个方面提出了自动化和机器人化必要性的建议^[25]:

① 严酷作业环境的改善(对降低艰苦性的贡献度)。

② 作业人员对危险作业(高空、地底深层、极限作业)的开放性(对提高安全的贡献度)。

③ 大量快速施工的实现(对缩短工期的贡献度)。

④ 节省劳动力、提高生产率(对保证安全、缩短工期的贡献度)。

⑤ 稳定质量(对提高质量的贡献度)。

⑥ 补充熟练工人的不足,应对少子化时代给土木工程带来的工人减少的问题(应对社会状况的贡献度)。

⑦ 克服气象、海象(对克服恶劣自然环境的贡献度)问题。

⑧ 改善环境(对环境保护措施的贡献度)。

应该说,满足上述贡献的机器人即有望在基本建设行业中得到普及。

根据社团法人日本建设机械化协会技术部会自动化委员会的报告^[26],土木工程机器人的技术开发有如下几项关键技术:

① 自动化、机器人化所必需的外围系统

技术开发。

② 可靠性技术的开发。

③ 高级判断功能技术的开发。

④ 遥控技术的开发。

⑤ 传感器技术的开发。

土木工程机器人普及的必要条件如下:

① 开发装置的价格低廉。

② 便于使用,便于制造。

③ 有效利用环境因素(安全措施、有效利用环境、客户服务制度)。

④ 用户采用的积极性(促销等)。

⑤ 建立租赁制度。

总之,解决上述关键技术后就具备了土木工程机器人普及的条件,土木工程机器人的开发和普及便指日可待。

长 健次

1.3 在第三产业中的应用

1.3.1 表演娱乐机器人

1. 分 类

日本机器人学会分别于1990年和2000年编辑了与娱乐机器人相关的特刊。在1990年特刊的卷首这样写到:工业机器人已经成熟,我们期待着它们能够为服务机器人所用^[1]。2000年特刊的卷首则这样写到:借宠物机器人所带来的人气向读者推介娱乐机器人^[2]。这两期特刊所涉及的内容就是这一类能向人类表达和倾诉情感与情绪的机器人。这两期特刊也让人们解读出10年来表演娱乐机器人发展的足迹。1990年的特刊中刊载的多为“踩木桶机器人”、“高跷双足步行机器人”、“双臂平衡两轮车”等表现人类技巧性动作的机器人,而2000年的特刊中,则以宠物机器人为代表,多涉及与人类交流为中心的研究课题。另外,1990年特刊的作者大多数是与大学相关的研究人员,而2000年特刊的作者几乎全是企业的研究人员。由此可见,在这10年当中,娱乐机器人、表演机器人已经从机械控制的技术层面转向交流层面,也就是说从研究层面转移到应用层面。

2000年以后的表演机器人和娱乐机器人(以下统称为娱乐机器人)的分类大致如下:

① 家用宠物机器人,或者说是充当说话对象的机器人。

② 以物理实体的形式充当家用信息终端的界面为主要目的的机器人。

③ 家用的以操纵娱乐为目的,或者以机器人形象表达图像、声音,达到娱乐目的的机器人。

④ 家用的、以机器人制作、编程获得乐趣为主要用途的机器人。

⑤ 在竞赛场上展开机器人竞技达到娱乐目的的机器人。

⑥ 在主题公园,利用恐龙、拟人机器人等将事先编好一定故事情节后表演的机器人系统。

⑦ 在主题公园,让游客参与进来,体验模拟控制的机器人系统。

⑧ 在家庭中,代替电视,用机器人将艺术家们创作的歌曲或舞蹈再现出来。

实际上,有些机器人与上述分类功能有重叠,有时又可能有遗漏。例如,众所周知的宠物型机器人——索尼的AIBO(图1.44),我们可以将它视为一个机器人平台,通过更改程序可以提供多种娱乐的方式。例如,扩展成无线LAN后就可以进行操控,用户编程序后又可以进行自娱等^[3]。其中一些机器人还可以作为福利设施,用于康复和交流^[4,5],所以很难将它简单地归纳在表演或娱乐机器人的领域。

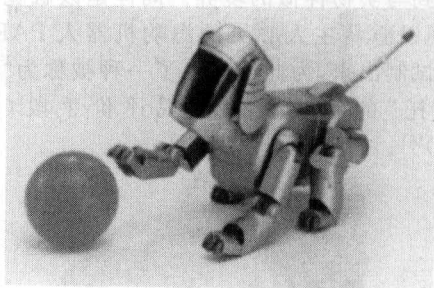


图 1.44 AIBO ERS-110(索尼)

2. 娱乐机器人的种类

1) 宠物机器人、伙伴机器人

1999年,4足自主机器人AIBO以25万日元的价格在日本国内通过互联网进行发售,仅20min即告售罄,它被作为出售速度最快的机器人而载入吉尼斯记录。它与现有的机器人之间呈现出两点显著的区别:第一个区别是它展现出与传统工业机器人、危险作

业机器人、看护机器人等为人类服务的机器人完全不同的应用方向;第二个区别是它不承载机器人物理特征所对应的功能,它的功能仅仅是与人进行相互交流。

伙伴机器人 AIBO ERS-110^[6] 的每条腿都有 3 个自由度,头部也有 3 个自由度,口部为 1 个自由度,尾部有 2 个自由度,共计 18 个自由度。它还搭载了彩色 CCD 摄像头、立体声扬声器、3 轴加速度计、角速度传感器,以及安装在多个部位的接触传感器。这个形象可爱的小狗还能步行。它的内部有 100MIPS 的 CPU、图像处理器、特制的声音处理用 LSI。软件则以行动规范型的体系结构为基础,通过对机器人自身的本能、情感进行仿真,选择自身与人或环境交互时的行为表现。

具体说来,AIBO 可以追击彩色球,搔首弄姿,伴随音乐跳舞等。后来,AIBO 的改进型又增加了声音辨识功能,并利用 PC 插卡等硬件扩展方式建立起无线 LAN,这样它就成了一个比其他宠物机器人功能更强的表演系统。

2001 年,市场上出现了另一个新的商品,它是一个不会步行,全身长满可爱绒毛的机器猫,叫做“宠物猫咪”,它的重点是通过触觉满足交流的愿望^[7](图 1.45)。宠物猫咪的面部表情和姿态凝聚了设计者的许多心血,以求达到与实物神似的境界。同样是以触觉为主,用以慰藉主人心灵的海豹机器人 PARO 也被试制出来,为此还提出了一种被称为“精神寄托”的很重要的主观评价手段(图 1.46)^[8]。



图 1.45 宠物猫咪(欧姆龙)

医疗机构和福利部门有一种所谓的动物疗法,不过发现动物存在卫生方面的问题和

毛皮等诱发的过敏问题,反观 AIBO、PARO 等机器人不存在类似的问题,因而引起了人们关于机器人治疗的兴趣^[4,5]。

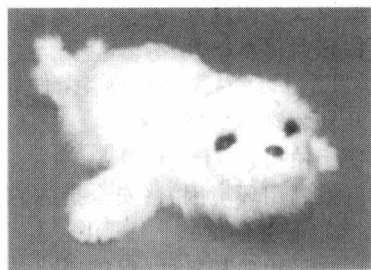


图 1.46 海豹机器人 PARO
(产业技术综合研究所,三协铝业)

同时开展的一个研究题目是把机器人当作老龄人的交流辅助系统(图 1.47)。首先将能够进行简单会话的宠物机器人置于寡居老人的家中,仅此举就能收到一些上述的机器人疗法的效果。该机器人是与网络相连的,因此可以向对方提供信息。接下去,人们期待这种系统能够在紧急联络和健康管理等方面发挥作用。



图 1.47 宠物精灵(松下电器)

2) 信息终端机器人

2001 年,基于声音辨识和与人会话交流的自主机器人“PAPER0”(NEC)问世。此前的试验样机 R100 机器人虽然也具有同样的功能^[9],不过它采用无线 LAN 通过 PC 机进行遥控,而 PAPER0 则在其内部嵌入基于笔记本电脑的计算系统,从而可以构成独立的机器人系统。PAPER0 的身高约为 40cm、质量为 5kg,它通过轮式机构进行移动,它除了具有完成家庭内电器的开关、邮件收发等功能外,还能进行猜谜等娱乐活动。

还有一点,PAPER0 是一台以伙伴机器

人为研究目标的实验样机,它与传统宠物机器人的最大区别在于它具有发声会话的功能,这样有助于它被遐想成一个活生生的人。

3) 操纵型机器人

遥控汽车、飞机、直升机等都是传统的、耳熟能详的操纵类娱乐玩具。另一条娱乐的渠道是计算机游戏,操纵游戏中的机器人主角深受人们的喜爱。还有临场感研究,其特点是操纵处于远方的机器人,并由传感器将信息反馈给操纵者。

在研究阶段,人们主要进行有关触感和力觉反馈的研究,不过在商品中更常用的是向操纵者提供图像和声音。专门为 AIBO 开发的商品化的操纵者提示系统的特点是借助于无线 LAN 和 PC 机,通过对 PC 机的操作来控制机器人步行的方向、速度和姿态等,并将机器人的图像、声音传送至 PC 机一侧。

4) 编程型机器人

这是一套通过自己动手制作机器人进行娱乐的所谓机器人组装套件,由自己来编写软件让机器人实现自主动作。

“智力风暴”包含一套积木模块、CPU 模块、电缆线(与电机和传感器连接),以及与 PC 机相通的红外线通信,通过搭建能够创意出各种形状的机器人作品(图 1.48)^[10]。

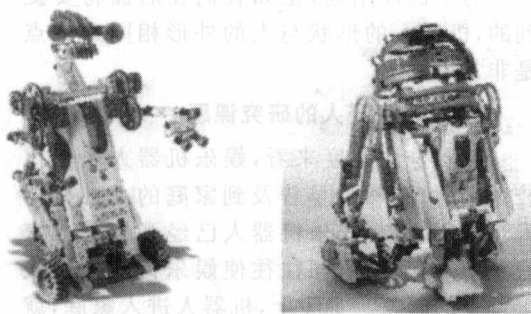


图 1.48 智力风暴(乐高公司)

“智力风暴”提供了 PC 机上的图形化编程界面,将用户个人编制的程序下载至 CPU 模块中即可实现机器人的自主运行。显然,这种编程型机器人很容易以玩具的形式出售,也可以用来作为中学、大学程序设计和机器人的教材。类似的东西还有日本科学技术振兴事业集团和万代公司共同开发的虫型机器人,用户也可以向机器人下载自己编制的程序,使其实现各种动作和反应^[11]。

另外还有一些编程型机器人,它们可以被视为利用真正的程序语言(例如,C++等程序语言)进行编程的机器人。AIBO 的公开程序 OPEN-R 也是基于 C++ 的编程语言^[12]。因为在直接访问 AIBO 内部电机和传感器的界面与 AIBO 所采用的软件对象之间是有通信协议约定的,这样根据协议就可以发挥硬件的功能,对自主型机器人进行编程。在后面介绍的 RoboCup Legged Robot League 同样也是利用这种编程环境实现的自主型机器人的足球比赛。

编程型机器人厂家往往不但开放 API,甚至连系统源代码都毫无保留地公诸于世,这与最近 Linux 等软件所采取的开放战略如出一辙。OpenPINO(科学技术振兴事业集团,北野共生系统工程)不仅公开了小型拟人机器人的软件,连它的硬件形式也完全公开,以推进技术的共享和进步^[13]。OpenHRP(产业技术综合研究所)也公开了它的拟人机器人的仿真技术,以促进机器人技术的普及^[14],尽管它并不属于娱乐机器人的范畴。

5) 比赛娱乐机器人

把机器人制作、程序编制与机器人比赛结合起来就达到了理论和实践的统一。近年来在日本,机器人比赛方兴未艾,参与人数不断增加,有的陶醉于参与,有的愉悦于观赏。RoboCup 就是其中的一个代表^[15]。

RoboCup 是以下一代人工智能为目标而设置的自主机器人足球比赛。比赛要求在动态环境中实时、实地控制机器人,包括解决多智能体的协调问题,以此替代一度是人工智能标准问题的人-计算机国际象棋比赛。RoboCup 的目标是在 2050 年以前组建一支由拟人机器人为球员的球队,参加按 FIFA 规则举行的比赛并争取胜利。

1997 年,借国际人工智能学会(IJCAI-97)名古屋大会的机会,RoboCup 举办了第一届比赛,此后形成每年一次的世界性活动惯例。2002 年的福冈比赛在福冈 Dome 举办,先后吸引了 12 万名观众入场观看。实际上,整个比赛由小型、中型、4 足型和拟人型共 4 个组别的机器人构成。RoboCup 是学术色彩很浓的、具有研究性质的活动,它不仅是一个比赛大会,而且还举办各种形式的专题讨论会,从不同的学术层面出发开展交流(图 1.49)^[16]。

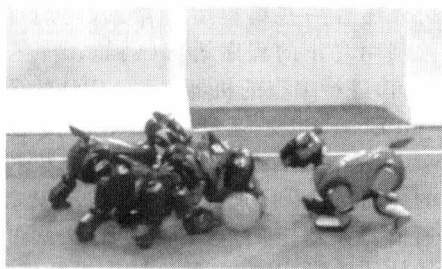


图 1.49 RoboCup 的比赛场景

目前,操纵型机器人比赛大会也不少,例如,日本的 RoboOne,比赛的主题是操纵双足机器人将对方摔倒^[17]。国际上也有好几个操纵型机器人将对方摔倒的格斗比赛,都十分有人气^[18]。这些机器人比赛一方面是队员从机器人机械制作中获得乐趣,另一方面是机器人的格斗也为许多观众所喜闻乐见。不过相对来说它们的学术含量不大高,反倒是比赛的色彩更浓。社会上对于这种格斗形式的机器人比赛颇有微词,不过在数量繁多的比赛大会中,这种形式的比赛确实能够吸引观众的注意力,从娱乐机器人产业的角度来考虑这是不能被忽视的。

6) 再现表演机器人

再现表演机器人就是事先确定好要模仿的恐龙、小鸟、人类等的一些精彩动作,然后定时地予以再现的机器人。我们看到,再现表演机器人目前在主题公园、展览会上已经逐渐找到它自己的舞台。它们的动作往往被设计得非常精巧,人们又在表皮的材质上下了不少工夫,表演堪称惟妙惟肖。

大型表演机器人多采用压缩空气、液压、水压来提供动力。不过,它们实际上是不能步行的,要想使其移动还必须在其他机构上多费些心思。

7) 模拟驾驶

1990 年的机器人学会志登载了一套引人入胜的马术训练系统。的确,最近出现了一种娱乐机器人系统的新形式,就是将银幕上放映的动画与运动座椅结合起来使人产生仿佛腾空移动的幻觉系统。在这样的系统中图像搭配效果很重要,它能够巧妙地利用人的视觉动感,从而产生身体的动感。

模拟驾驶与前述几种机器人最显著的区别在于它更关注人们的认知机理,它的研究开发课题是如何产生逼真的幻觉。在效果

上,它与有关操纵型机器人部分中介绍过的临场感技术有共同之处,不过它的临场感更加逼真,这样的娱乐系统预计今后还会增加。

8) 媒体机器人

媒体机器人与前面所述的再现表演机器人有类似之处,不过它的目的略有不同,是特别为家庭娱乐量身打造的。小型拟人机器人 QRIO SDR-4X 的身高约为 60cm,被称为动作表演娱乐机器人,它能在音乐伴奏下翩翩起舞,甚至多台机器人虽然无伴奏却能边舞边唱,上演各种自助表演。从这一事实,我们不但可以预见具有主题的再现表演机器人即将进入家庭,它的影响甚至可能更加深远。人们已经习惯用电视机显示屏播放普通 CD、DVD 上面的音乐和舞蹈表演,其实机器人可以作为一种新的媒体进行表演(图 1.50)。

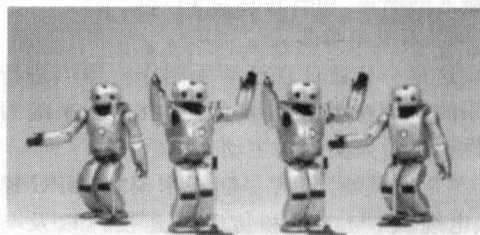


图 1.50 QRIO SDR-4X(索尼)

为了这种用途,正如我们在后面将要提到的,机器人的形状与人的外形相同这一点是非常重要的。

3. 娱乐机器人的研究课题

从安全性角度来看,娱乐机器人属于比较现实的、能够最早普及到家庭的一种机器人。众所周知,娱乐机器人已经开始进入家庭。不过,娱乐一词往往使娱乐机器人给人以玩具的印象。实际上,机器人进入家庭,就必须要实现与人和环境的交互,也就需要集成图像处理、语音识别、双足步行控制等单元技术,需要在实际环境下实现实时性、鲁棒性更强的动作控制技术。甚至会遇到一系列迄今未曾面对过的研究课题。

下面就完全自主行动所必需的行动控制体系结构、情绪模型、情绪模型与符号接地问题、机器人形状(或动作)对人类认识活动的影响问题等分别加以说明。

1) 行动控制体系结构

娱乐机器人应该是一个综合图像处理、

语音处理、步行控制等多项技术的自主系统,因此行动控制体系结构理所当然地成为重要的研究对象。20世纪90年代在智能自主机器人中引入了以包孕(subsumption)体系结构^[20]为代表的行动规范型体系结构。它考虑了动态变化的现实世界环境,同时将几种简单的行为模型加以组合,以便根据实际情况选择适当的行为。

现在,针对娱乐机器人的行动控制体系人们提出了混合型行动控制体系结构,其特点是将目前比较成熟的体系类型和行动规范型两者的优点结合起来。另外,也提出了几种能像人那样制定规划,又能适应现实环境变化的体系结构^[19]。

2) 情绪模型和符号接地问题

娱乐机器人应该能够倾诉人的感情和情绪,因此有关情绪模型和情绪表达的研究非常重要。建立情绪模型的时候一般都参考心理学模型,基本情绪可以用 Ekman 归纳的六种基本模型(喜、悲、怒、恐怖、惊讶、厌恶)来表示^[21],情绪的基本空间,除了快/不快和觉醒度二维轴线外,还可以使用确信度^[22]和 stance(亲近性)^[23]来建立机器人自身情绪的模型。高西、Breazeal 等利用上述情绪模型制作了机器人的脸谱,以验证表情的相互作用^[22,23]。

研究人员同样建立了宠物机器人 AIBO 和伙伴机器人 QRIO 的情绪模型或本能模型,并提出了基于动物行动学^[24]或人类生态学^[25]的行动控制体系^[26]。脑研究指出,情绪在动物行动选择或价值判断中起着非常重要的作用^[27]。对情绪功能建模并把情绪体验记忆下来,再把情绪记忆用于行动选择的价值判断,就能实现类似于动物或人一样的行为举止。藤田将认知科学中的“符号接地”概念加以扩展,称之为“情绪接地”,提出给符号赋予一定意义的方法^[28]。

3) 人的认知和机器人形状

既然娱乐机器人的显著特征是能够倾诉人的感情和情绪,机器人的形状当然就具有很大的意义。镜面神经元是脑研究的重大发现之一,它与这种人的认知机理有密切的关系^[26]。所谓镜面神经元是猴子或人作出认识动作的时候,认识者观察某一动作与实际再现这一动作所用到的神经元是同一个。由这

个事实可以推测,对应于形同人类的拟人机器人动作的脑部的反应与对应于轮形机器人的脑部的反应是不同的^[28]。姑且不讨论拟人机器人将来是否能够起到人的作用,目前我们可以预想,在用于倾诉情感和情绪的娱乐方面,拟人机器人倒是绝对不可缺少的。

关于典型的拟人机器人,我们还可以举出 QRIO、ASIMO、HRP 等例子。其中强调娱乐用途的是 QRIO^[29]。QRIO SDR-4X 的身高约为 60cm、体重约为 6kg,如果把手指的自由度也算在内,它共有 38 个自由度,它的硬件系统包括立体视觉、多媒体扬声器等,软件系统则能够达到实时进行自适应步行控制,在 10mm 左右不平整的地面上进行步行的水平,甚至能够依靠实时步态生成技术实现外力自适应步行。它能够唱歌跳舞、记忆人的相貌和声音,在遥控计算机的帮助下能辨识 6 万个词汇进行连续发声,并能记忆情感经验,有选择地对人做出自主性的亲密行为动作。

藤田雅博

1.3.2 保安机器人

1. 保安机器人的用途

保安业也是期待引入机器人的行业之一。保安人员的工作包括夜间在楼内巡视值更、白天在入口处管理出入、接待来访人员等。长时间从事这些工作会给人带来体力和精神上的负担,因此比较适合机器人工作。

所谓巡视值更就是定期在建筑物的走廊、大厅、洗手间等地方进行来回查看,以便尽早发现火灾、不速之客、设备不良等事故,防患于未然。在执勤中,保安人员需要最大限度地利用自己五官的功能在楼内进行巡视,一旦发现异常情况,立即采取适当措施并加以处置,将事故损失减少到最低。这其中有些作业是可以交给保安机器人去做的,起到协助保安人员、减轻保安人员工作负担的作用。

2. 保安机器人应具备的功能

巡视保安机器人必须具有如下功能。当然,直至 2003 年,还没有一台保安机器人能够集以下所有功能于一身,对于那些不能满足要求的功能,目前暂时只好由人或其他手段加以弥补。

1) 自主移动

一般来说,保安机器人应该能够按照事先输入的地图行走,利用环境传感器检测障碍物和行人,安全自主地在地面上移动。不过,也有一部分保安机器人能够沿事先在顶棚上敷设的轨道进行巡视。

2) 异常发现

可以想象的事故种类非常多,如不速之客、火灾、漏水等。不过机器人携带的传感器数量毕竟有限,因此现场也需要安装一些传感器与机器人配合。就目前的状况而言,多数可应用的传感器并不是为搭载在移动载体上而设计的,为此必须开发专用传感器。

3) 情况判断

一旦发现人或障碍物,需要机器人分清是不明人物还是不明物体,对机器人来说这不是一项轻松的任务。目前的解决办法是机器人发现人或物体后立即向位于其他地点的保安人员进行通报,依靠保安人员来确认。当然,随着图像识别对人物判断研究的深入,一定可以开发出能够搭载在保安机器人上自行判断情况的装置。

4) 事故处理

目前,保安机器人在事故处理方面所能胜任的是火灾的早期扑灭。当然,发现火灾后既可以由机器人自行灭火,也可以告知保安人员遥控灭火。

3. 保安机器人的现状

在自主巡视保安机器人产品中可以举出 GUARDROBO C4(综合警卫保障)、T63,以及在清扫机器人上安装具有警卫功能的保安机器人(富士重工)等。下面以商品化的保安机器人 GUARDROBO C4 为例加以说明,图 1.51 为 C4 的外观。表 1.4 给出了它的规格参数。

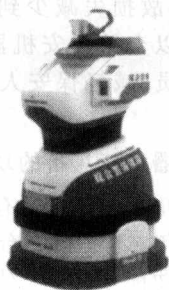


图 1.51 GUARDROBO C4 的外观
(综合警卫保障)

表 1.4 GUARDROBO C4 的规格参数

外形尺寸	640mm(W) × 710mm(D) × 1 330mm(H)
质量	约 90kg
速度	50 cm/s
爬坡能力	±5°
电源	DC24V
	DC12V(25A · h) 电池 × 2 串联
连续行走时间	约 3h
充电时间	约 3h

1) 系统构成

保安机器人所构成的保安系统如图 1.52 所示,由保安机器人、监视装置、通信装置、充电装置、升降控制装置等构成。

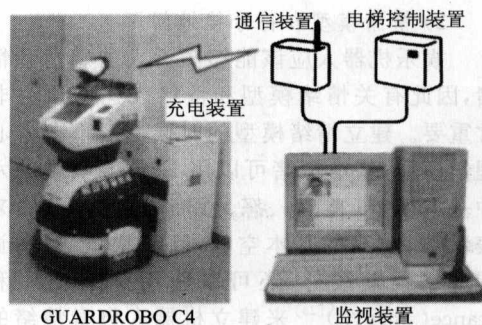


图 1.52 保安系统的构成

巡视路径和建筑物地图是被事先输入到机器人中的。一到了巡视时间机器人即脱离充电器开始进行巡视。机器人由 CCD 传感器获得图像,在巡视过程中不断地向监视装置发送各种传感器和机器人的状态信息。保安传感器一旦发现异常情况,就立即从机器人向监视装置发送警报,后者即刻发出警报声并从图像上提醒保安人员注意。保安人员接到警报后,通过摄像头的图像或监视装置所显示的信息采取适当的处理措施。如果是火灾警报,则由监视装置遥控机器人向传感器感知到的方向移动以便加以确认,若确认果真属于火灾,则启动灭火处理程序并发出紧急警报。如果属于可疑人员警报,则保安人员可以通过话筒和扬声器向其发出身份查证要求,并通过对话来判断该人是不是不速之客。

每次巡视完成后,机器人都会自动回到充电装置处去重新充电。

保安机器人在白天还有别的用途,例如,利用机器人的触摸屏提供室内设施向导信

息,或者指引带路等。

2) GUARDROBO C4

该机器人本体的左右两侧各有一个驱动轮,前、后各1个轮,共4个轮子支撑机身。它的最大行走速度为50cm/s,爬坡角度为 $\pm 5^\circ$ 。由于机器人是按照轮椅的活动空间进行设计的,因此它可以沿轮椅的斜坡行走。

该种机器人在驱动轮上安装了码盘,根据车轮的累计距离和光纤陀螺的角度信息可以计算机器人的位置。我们知道,利用航位推算法计算的位置与实际行走距离之间存在一定的比例累积误差,因而推算出的位置与机器人的实际位置会有很大的出入。为了修正累积误差,可以借助于外部传感器对环境中的路标加以识别,并与地图中记录的路标模型加以比较,求得修正值。考虑到工作场所的千差万别,该机器人准备了多种修正算法。例如,测定环境中的到平坦墙面的距离,参照事先输入到机器人中的路径和到墙面距离的信息,利用顶棚上已有的光源环境和借助事先在行走路径上布置的非接触ID标签进行位置辨识。

为了保证机器人的行走安全,除了采用超声波距离传感器和光距离传感器之外,还在机器人的底部安装有接触式传感器以负责人和障碍物的检测。

机器人在楼层之间的移动借助于电梯,它利用无线方式实现电梯的控制。

警卫功能传感器包括人体检测传感器、火焰检测传感器、漏水传感器等。机器人还装有针孔摄像头,并通过通信装置将摄像画面不断发送到监视中心。

在机器人上还装有触摸屏,它除了提供各种信息之外,还可以担任室内向导。

4. 今后的发展

总之,引入保安机器人的环境存在千差万别,其担当的任务也形式多样,因此对保安机器人提出的功能要求也是形形色色的。在这些功能当中,有的实现起来比较简单,有的实现起来还有待时日,如果打算在短时间内实现这些功能,那么所需要的成本会非常高。

今后,保安机器人在技术开发方面应该特别予以注意的是机器人本身事故的应对措施,以及使机器人具有更积极的行为能力。

目前,保安机器人的角色仅限于充当保安人员的眼睛和耳朵,即属于收集图像和传感器信息的、起监视作用的机器人。今后要想让机器人能够独立承担警卫工作,那么与它自身周围状况和事故的识别、自主判断,以及与行动相关的一系列技术将会起到非常重要的作用。

下笹洋一

1.3.3 清扫机器人

清扫机器人,即代替人进行清扫工作的机器人,它能够一面在清扫场地中移动一面完成清扫作业。

在日本,清扫机器人的研发历史可以追溯到20世纪70年代初期。据记载,日本制造商与美国企业合作开发的包括超高层建筑在内的自动擦窗系统是最早的清扫机器人。

高层建筑窗户玻璃的清洗是一项非常危险的工作,从保护隐私的角度来说,也要求擦窗作业机器人化。清洗高层建筑窗户玻璃的机器人在自动化和功能的实施方面相对容易一些,因此使它成为清扫机器人的先驱。目前,它已经进入普及阶段,在许多高层建筑中得到应用。

20世纪70年代末期,地面清扫机器人的开发也得到具体实施。为了能把劳动力从大楼管理工作的3K(危险、费力、肮脏)作业中解放出来,日本的设备制造商和大楼管理者共同参与到相关的开发工作中来。

从20世纪80年代中期起,将自主移动机器人技术移植到地面清扫机器人的研究开发报道就相继不断^[36~38]。

1990年以后,随着微型计算机、传感器、电池等技术的进步,清扫机器人的性能不断提高^[39],产品水平不断改进,现在已经在不少实际的清扫现场实现了实用化。

在行走控制方面,地面清扫机器人采用航位推测法(dead-reckoning)和光纤陀螺仪(gyro sensor)的位置识别手段,以及基于测距传感器和接触传感器的障碍物检测手段。

几乎所有的清扫机器人在结构上都采用在行走车体上搭载清扫工具,边行走边清扫的形式,只是根据不同的用途和目的在机器人的形态方面需要做一些改进^[40]。下面按照商用和家用两种类型进行概要的说明。

1. 商用清扫机器人

商用清扫机器人清扫的对象多为大楼、车站、机场等的大厅或广场,因而它采用电池供电,并搭载大型清扫工具。

如果清扫的场所很空旷,障碍物不多,那么清扫机器人可以采取直线往复的运动形式对整个清扫区域实现简单的、遍历式的清扫,清扫工具的种类主要有以下几种:

1) 真空吸尘型

在机器人本体的底部安装吸尘嘴,并且有集尘室和电动风机与之相连,在抽吸力的作用下地面的尘土被吸入。一般在吸嘴附近设有旋转圆刷以提高吸尘效果。

图 1.53 为羽田机场采用的地面清扫机器人,它可以自动清扫机场中央大厅的地毯地面^[41]。该机器人不仅能够自动行进,而且手动操纵也很简单。表 1.5 给出了它的主要性能参数。

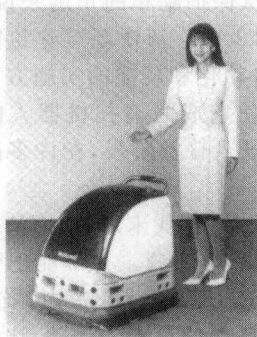


图 1.53 商用地面清扫机器人(松下电器)

表 1.5 商用地面清扫机器人的主要性能参数

尺寸、质量	600mm(L) × 710mm(W) × 720mm(H) 质量约为 80kg
连续使用时间	1h 以上(每次充电)
清扫性能	500m ² /h
操作模式	自动清扫、指定清扫、手动清扫、移动
行走速度	高速(70cm/s)、中速、低速三挡可切换
行走方式	V 字形退回的前后行走
行走精度	±10cm/10m(地毯地面、倾斜地面)
自主导航方式	光纤陀螺仪用于方向检测 车轮码盘用于距离检测
传感器	超声波测距传感器、磁性传感器、台阶传感器、碰撞传感器

2) 地面擦洗型

地面擦洗型的作业任务是针对硬地面的清洗,备有清洗水箱和旋转清洗刷。工作时,机器人一面行走一面向前方喷洒清洗液,并用旋转刷摩擦地面,污水在机器人本体的后方被回收。

这种形式的机器人多出现在欧美国家开发的产品中,其位置识别的手段采用激光扫描仪^[40,41]。

2. 家用清扫机器人

家用电器的发展减轻了家庭劳动的负担,不过自古以来扫地却仍然依靠人力来完成。家庭清扫自动化将为主妇挖掘出更多的休闲时间,这就是开发家用清扫机器人的理念。

家用清扫机器人与商用的区别在于活动环境不同。前者的活动空间狭小,同时还要应对多种多样的障碍物,而且其操作员大多为家庭主妇,因此一个基本的要求是操作的简单和安全。

2003 年以来,国内外的很多制造商都在摸索一条将商用清扫机器人的关键技术向家用清扫机器人转化的途径,走一条体积小、质量轻、价格低的开发路线。下面通过一个事例来说明有关的技术内容^[42]。

图 1.54 为一台家用地面清扫机器人的外形,机器人由行走部分(应该能适应房间形状和地面状态)、安全部分(遇到热源和阶梯能自动停止)、自主控制系统组成。自主控制系统中的各种传感器能够获得地面尘土量等收集部分所需的各种信息,将信息融合后选择最适合环境状况的移动控制方式。

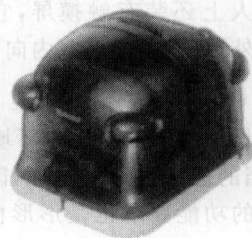


图 1.54 家用地面清扫机器人(松下电器)

该机器人的基本结构由伺服电机独立驱动的左右驱动轮和自由旋转的脚轮组成,在本体的前部装有旋转刷和吸尘嘴,并配有充

电电池。它的主要性能参数如表 1.6 所示。

表 1.6 家用地面清扫机器人的主要性能参数

尺寸	367mm (L) × 292mm (W) × 265mm (H)
质量	9.8kg
连续使用时间	约 55min (每次充电)
充电时间	约 2h
清扫性能	80m ² /55min
行走速度	最大 30cm/s
传感器	红外线测距传感器、超声波测距传感器、感压传感器、陀螺仪传感器、方向传感器、红外线热传感器、质量传感器、过载传感器

1) 行走部分控制

如果房间中央有障碍物,那么为了减少尘埃的残留区,机器人将采用所谓的十字模式进行清扫行走(图 1.55)。

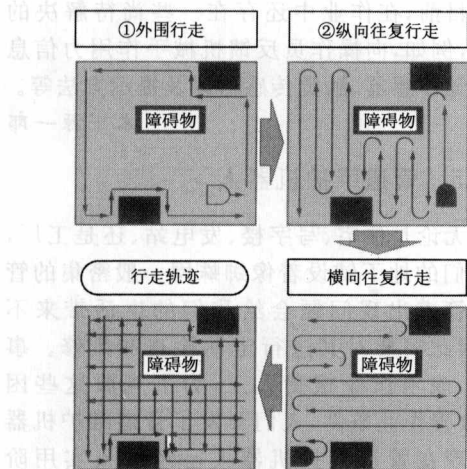


图 1.55 十字模式行走清扫

实现上述行走采取的技术措施有:①在机器人本体四周设置红外线测距传感器,在前方设置超声波测距传感器,在本体周围的缓冲器上设置感压传感器,这样即使障碍物的形状各异、材质繁多也均能被检测出来,实现障碍物回避;②用陀螺仪进行姿态控制,并用方向传感器检测脚轮的朝向,以获得行走偏离的信息,这样即便是在地毯上也能准确地进行直线行走^[43]。

2) 安全部分控制

①在机器人本体的四个角分别设有检测地面距离的红外线传感器,前部设有检测台阶的传感器,这样既能提前回避障碍,又能避

免轮子悬空或翻倒。

②本体的前方和左、右两侧分别设有红外线热传感器以避免机器人走近高温热源。

③机器人还设有检测驱动轮打滑和本体顶撞的传感器,一旦发生异常情况可以立即停止运行并报警。

3) 集尘部分控制

机器人设有红外线传感器以检测从吸尘嘴吸入的灰尘,如果灰尘量大,则让车体慢速行走,并加大吸力;反之则加快行走速度,减小吸力。

这样操作的效果是在灰尘少的区域运行速度快,灰尘多的区域也能清扫干净,提高了使用有限的电池容量的合理性,同时能够满足长时间运行和高吸尘力两个方面的要求。

蔡内秀隆

1.3.4 带电操作机器人

1. 配电作业

工业机器人的开发,使这些机器人在车间室内作业环境下取得了巨大的应用成果。尝试将机器人转移至室外环境应用的成果之一就是带电操作机器人。

配电作业是指向一般家庭或车间输送电力的配电线路的施工作业。在这些线路中,有超高压(22kV 或 33kV)、高压(6.6kV)以及市电电压(100V、200V、400V)几种。

在电力线路中又分成空中架设电线和地下电线,本节只考虑前一种配线施工,这些工程如下:

① 新规划入网的供电线路。

② 道路工程或住宅改建等要求的线路改造工程。

③ 电缆增容工程。

④ 设施改造工程。

其中,第①类工程是为增加新的设施而进行的,而第②~④类工程则必须在带电状态下进行作业。

在不停电状态下施工的工程称为带电作业方法,图 1.56 给出各种作业方法。

不停电作业法分为带电作业法和临时停电作业法。后者将线路旁路后进行作业或者利用发电机向停电区域送电。前一种方法,即带电作业法又分为直接带电作业法和间接

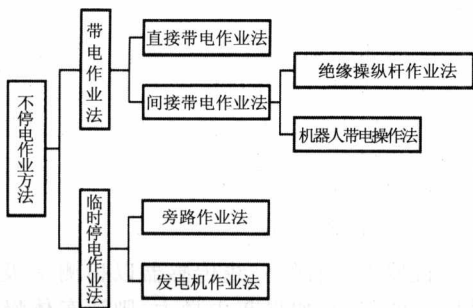


图 1.56 不停电作业方法的种类

带电作业法。直接带电作业法让作业人员穿戴电工绝缘橡胶手套、绝缘服(橡胶服)和绝缘橡胶长靴进行作业。其存在的问题是一旦绝缘服的某个部位出现破损,往往由此引起触电感应而造成死亡事故。为了避免这类事故的发生,人们改用一种被称为绝缘操纵杆的绝缘棒进行间接作业的方法。不过绝缘杆前端的工具很重,操作起来实在是一件费力的事情,属于重体力劳动。

因此,人们开发了机器人作业法替代绝缘操纵杆作业。

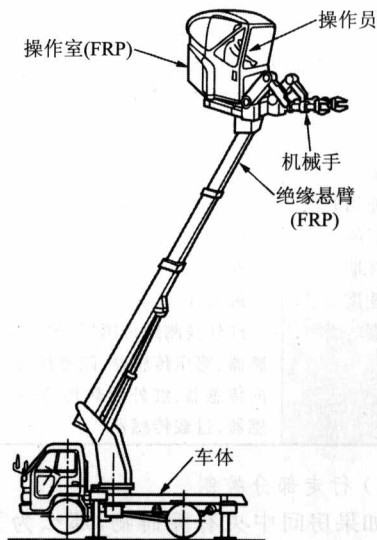
由于机器人施工法是带电操作,因而把它称为带电操作机器人,既然是配线作业,所以也称之为配电作业机器人。

2. 带电操作机器人

带电操作机器人由操作室(搭载在高空作业车绝缘悬臂的前端)和机械手组成,分为搭乘操纵型和地面操作型两种形式:前一种形式操作员乘坐在操作室中升空,通过直接目视来操作机械手;后一种则是在地面上遥控机械手,通过监视器观察作业情况,利用操作手柄或以主从手臂的形式遥控操作(图 1.57)。

3. 作业

为了进行带电操作,操作员必须搭乘在与高压线路隔离的斗形或密闭形操作舱内,通过目视或利用操纵手柄,或利用主从手臂的形式进行遥控作业。如果操作员位于地面上,那么为了实现远距离遥控需要视觉提示,这样就用到了监视摄像头、立体视觉、跟踪摄像灯。为了避免出现视觉的死角需要移动视点,或者利用多个摄像头,以及各种非接触传感器对现场作业情况进行监视。

图 1.57 带电操作机器人和高空作业车^[44]

目前,在作业中还存在一些尚待解决的课题,例如,向操作员反馈机械手作用力信息的力觉传感器、触觉传感器以及提示方法等。

木下源一郎

1.3.5 管道维护机器人

无论是住宅、写字楼、发电站、还是工厂,在它们的地下铺设着像蜘蛛网一般密集的管道。管道出现问题会给我们的生活带来不便,因此需要对其进行定期检查和维修。事实上,该项作业很费人工,为了克服这些困难,改善作业条件,人们开发了管道维护机器人。现在管道维护机器人已经进入实用阶段。管道维护机器人的相关技术可能还适用于涵渠、水管等,下面来详细地说明。

1. 机器人的组成

与其他机器人相同,管道维护机器人可以分为末端执行器、机器人本体、控制器、能源供给装置等几个模块。管道维护机器人多为移动机器人,将其分为管内型(机器人进入管道内部)和管外型(机器人在管道外部,包括仅末端执行器进入管道的在内)。机器人作业的环境有气体、液体、气液混合等场所,必须根据工作环境决定其防爆结构和耐腐蚀程度。

管道维护的检查和作业是两种性质迥异的任务。表 1.7 给出了部分作业内容的介绍。

检查和作业的方法应该从管径、材料、结构、设备的具体状况(垂直、水平、倾斜、接头结构和形状、隔热材料和埋设等)、管道内部情况、检查作业时管道的状态(是否仍在使用)等诸多因素来考虑决定。显然,机器人不仅是检查和作业设备的移动和定位的载体,它在实现新的检查方法、扩大作业对象方面也起着重要的作用。

表 1.7 管道维护机器人的检查和作业的内容

项 目	内 容
检查	目视检查(利用摄像头、红外线摄像头等检查异常、异物、腐蚀情况)、无损检查(利用超声波、涡流传感器等进行探伤、检测板厚或涂层的厚度,利用激光检测形状)、采样(管道材料的微量采样)、管道内的气体分析(缺氧检测、爆炸防范、有毒气体成分的分析等)、混凝土完好性调查(利用超声波速度测定、反射率测量、中性化层深度测量等)、雷达检查(检查埋设管道周围的空洞)、搭载检查用的放射源仪器在管内移动等
作业	管道内部清扫(管道内壁的研磨、附着物的清除和排出)、修补(焊接、内衬修补等)

1) 末端执行器

如表 1.7 所示,管道维护机器人的末端执行器有检测和作业两种功能。它们都需要根据搭载的具体要求专门进行设计。

机器人的用途有目视检查、无损检查、采样等。摄像头是机器人移动控制的重要对象,利用目视检查可以确认异常或异物,而通过图像处理进行观察,可以从对象形状的变化、管壁颜色的变化等判断管壁的腐蚀程度。摄像头可以被置于云台上,也可以固定不动,通过特殊设计的光路系统和图像处理得到机器人周围管壁的图像数据。目视检查对照明数量、配置情况、光源强度都提出一定的要求,如何能满足要求颇费思量。

表 1.7 仅仅列举出管道维护机器人作业的部分实例,应该在此基础上予以推广。

2) 机器人本体

设计机器人结构时应该考虑的条件与前面提及的检查和作业方法中的具体讨论内容相同。

显然,管道内部检查的优点是非常直接和直观。例如,对地下管道的检查,如果是传统的外部检查需要挖掘许多土方,改成内部

检查后可以减少大量的劳动,因此对此需求的呼声很高。已经投入使用的管内检查移动机构为轮式或履带式机构。如果在有水的环境中作业,则应该把推进器与水隔离。当然,其他机构的组合也能够达到移动的目的^[45]。

如果管道维护机器人的移动是靠与管道壁面的接触实现的,那么由于管道的走向或接触部位状态的变化,有时仅仅依靠其自身的重力无法保持机器人的位姿和移动,因此需要寻求新的推进方法。例如,既然是在管内移动,就可以采用作动筒、缩放机构或弹簧对管壁施加正压力以提高驱动轮接触管壁的压力,进而保持机器人的姿态,得到必要的推进力。另外,如果管壁为磁性材料,也可以采用磁性驱动轮或磁性履带。此外,行走系统还必须考虑如何跨越管道接头部分内壁的台阶,穿越弯管(改变方向)等。

管道维护机器人一般采用遥控操纵,因此控制和电源电缆的处理非常重要。如果无线电波确实可以覆盖工作区域,甚至出现故障时回收机器人也不存在问题,那么采用内部电池与无线控制模块组合的驱动方式也无妨。不过这在很多情况下都不适合,还不如换成钢丝绳回收,与钢丝绳同轴敷设控制和供电的电缆。电缆卷取机构既可以固定在管外的遥控操纵一端,也可以固定在机器人上。在前一种情况下,管壁与电缆之间的摩擦会给移动机构造成与移动距离成正比的阻力,在设计前应该事先通过实验测取管道距离与阻力之间的关系。后一种情况可以改善管壁与电缆之间的摩擦阻力,不过却增加了机器人结构的复杂程度,显然在控制方面也必须增加电缆放出和卷取的环节。

2. 应用举例

1) 电 力

用于电力设备维护的机器人多种多样,管道机器人也是其中之一,下面介绍部分应用实例。

主管道诊断机器人(东京电力、CXR)主要是以火力发电厂的主蒸气管道、重热蒸汽管道等为对象,利用 CCD 摄像头作目视检查,并利用激光束变位计测量腐蚀量、锈蚀层的厚度,进行焊接部位的超声波探伤等^[46]。

管道内部清扫机器人(东京电气公务所、CXR)用于发电厂主蒸汽管道内部的异物检查,若确认有异物残留,则采用空气抽吸或电磁铁吸附的方法加以清除^[47]。

管道内壁遥控检查维护机器人(IIC)以压力容器内径为40mm的管道内壁为检查对象,利用CCD摄像头作目视检查、液体浸透检查(PT),对锈蚀部位清刷和打磨,对包覆层进行焊接修补等^[48]。

超高速全自动ECT探伤系统(三菱重工)用于核电站蒸汽发生器内部导热管的检查,而冷凝器清扫检查机器人(中国电力、联合造船)用于驱动汽轮机旋转的蒸汽冷却用冷凝器细管的刷洗和涡流探伤检查。这些机器人的工作原理都是借助于机器人本体移动将末端执行器从管道外部插入实施检查和作业^[49,50]。

过热或重热器管道检查机器人(中部电力)的作业方式是一面采用履带在过热器或重热器管上爬行,一面清扫管间距很小的导热管束,并测量管壁的厚度和外径^[51]。

火力发电厂的微粉煤输送管道的内壁往往会被微粉煤磨损,为此开发了微粉煤管内壁检查机器人(中部电力)。它装有超声波厚度计、监视CCD摄像头,采用电磁轮式附着方式在管道内部移动。机器人采用内压防爆结构(通风式)设计(JIS C 0903),即往内部通入加压空气,防止可燃微粉煤的侵入,起到防爆作用^[52]。

水电站的高水头水压铁管的渗漏检测则经常利用ROV^[53]。

火力核电站的冷却水往往使用海水,如果在管道中附着了海洋生物(藤壶、紫菜、藻类等)会导致冷却效率的降低和涂层损伤腐蚀等问题。为此,分别开发了采用高压水清洗的海水管道清扫检测机器人(东芝)、海水管道内部清扫机器人(中部电力、联合造船),以及取水管道清扫机器人(中国电力)。后者的特点是在底部装有切刀和车轮,利用推进器将其压至底部壁面,它在移动中将取水、出水管道的附着生物清除干净^[54~56]。

与管道类似的检测还有烟囱检查机器人(东电工业)。它利用具有台阶越障功能的磁性车轮附着在钢制烟囱的表面行走,在涂层膜上面测量钢板的厚度^[57]。

2) 煤 气

在供气设施维护机器人中有一种球形步行机器人(东京气体、日立),它有8条腿,端部安装吸盘,能沿球形储罐表面移动,采用超声波探伤检查焊接部位。还有一种球罐检查机器人(大阪煤气),有4个永久磁铁的车轮,沿球罐的焊缝部位移动,利用TOFD法(自动超声波检查)探伤^[58,59]。

气体管道内壁检查有好几种常用的方法,如管内摄像头的目视检查、涡流探伤法(从内向外的外壁腐蚀检查)、遥控场涡流法等。实用的简易修补法有带载接缝密封法、管内焊接机器人等^[60]。

图1.58为管道内壁焊缝检查机器人(大阪煤气、CXR)。它通过侧面的摄像头和缝隙激光从管道内部检查焊缝的凹陷和缺焊等瑕疵。另一种管内多用途机器人(大阪煤气)采用双重磁性车轮,以扩大内壁检查的应用范围,适用于T字形、L字形等多种形式的管道的检查^[61,62]。

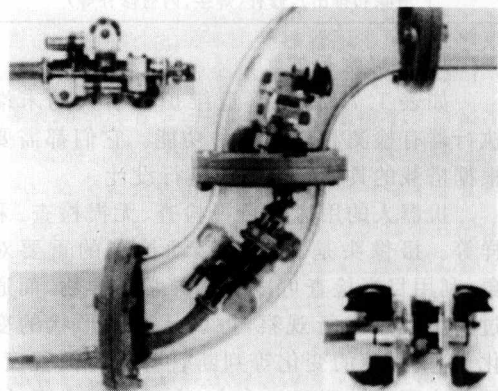


图 1.58 管道内壁焊缝检查机器人
(大阪煤气、CXR)

内壁自动补强焊接机器人(大阪煤气)解决了历来气体管道内部补强焊接必须进行开挖施工的问题。这是一个机器人系统,由磨削机器人和焊接机器人组成。磨削机器人分成好几节:磨削头部分(装有侧视摄像头和待焊接部位的预磨削砂轮)、控制器部分、行走部分。焊接机器人同样采用分节结构,由焊接部分(由计算机遥控的自动MAG焊机完成内壁焊接不足(IP)部位的补强焊接)、两台行走部分、控制器部分和焊接电源等组成^[63]。

3) 上下自来水管

以东京为例,它的下水道管路的长度达15 000km,其中80%管道的直径小于80cm,人员肯定是无法进入的。目前,这样的下水管道均采用携带无线摄像头的机器人定期进行损伤情况的观测和记录^[64]。

在微生物的作用下,污水产生的硫化氢会生成硫酸,加速混凝土下水管道的恶化。图1.59为下水管道检查机器人(东京都下水道局、机动技研)。机器人可以进入老化的下水管道中,由于混凝土管道中性化层的深度不同,超声波的传播速度和反射率数据也不同,以此推测管道的剩余强度^[65]。

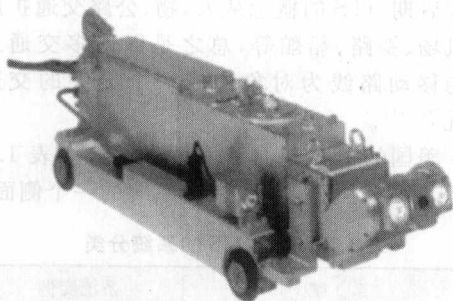


图1.59 下水管道完好度检查机器人
(东京下水道局、机动技研)

据报道,日本东京每年因下水管道破损造成道路塌陷事故超过1000例。为了弄清楚地下水在下水管道周围溶蚀的空洞情况,相继开发了自行式雷达检查机(东京、鹿岛建设),以及将摄像头和雷达复合成的管内探查系统(BURNAMO)^[66,67]。

另外有一种自行式打孔机器人,是为了解决下水道工程与各个用户之间的连接孔口的开孔问题而开发的(北菱)^[68]。

不仅是下水道维护,在下水道还可以敷设光纤通信的光缆。用于光缆敷设工程的有光缆敷设机器人(东京下水道服务,日本HUME)^[69]。

4) 一般工厂

输送管道检查机器人(通用石油、CXR)具有分节移动机构,靠搭载的摄像头进行目视检查,靠搭载的激光束变位计检测腐蚀程度,用于石油化工厂180°U形弯管的分解加热管路对流管的检测^[70]。

锅炉管道检查机器人(IHI)可以进入加

压流化床(PFBC)锅炉集束管道的狭小缝隙内进行检查。锅炉管道有炉壁管(埋入锅炉壁面内部)和层内管(置于内部)两种,对应于不同形式的专用管道检查机器人,利用超声波传感器和涡流传感器测量管壁的厚度,通过CCD摄像头监视检查位置的状况^[71]。

关于烟囱的检查,本节在1)中已经作了介绍。现在,有一种用于垃圾焚烧场烟囱内部清除堆积烟尘的烟囱清扫机器人。机器人从下部入孔处钻入烟囱,进入烟囱的内部后它像雨伞一样张开,用车轮和清扫刷压紧壁面,一面回转一面进行清扫。机器人的升降则是依靠从烟囱顶部垂吊下来的缆绳手动实现的,如果将清扫单元替换成壁厚测量装置,那么清扫完毕后还可以进行内壁钢板厚度的测定^[72]。

5) 海底管道

敷设石油天然气海底管道时,埋设的敷设必须要考虑到航行船舶抛锚、海底开采、未来疏浚等多种情况。为了检查埋设的情况,欧洲把罗盘、侧面扫描声纳、浅地层剖面仪等搭载在ROV上实施检查。在日本用船只搭载水下磁性探查机、声波测深机等进行被覆层厚度的测量。检查管道自身的腐蚀程度有多种方法,如果检查管道内壁,可以用智能压载物或缆绳式检查装置,选择超声波法、漏磁法、遮光法、透明度法等方式。如果进行目视检查,则采用摄像头CCTV(color camera television)方式,或者检查人员亲自进入管内检查。人进入管道内检查限于管径超过30ft以上的管道,而且由于存在环境有害气体的问题,在安全方面面临一些隐患。因此,目前大多数都采用智能压载物的检查方式,但是这种方式不适合小口径和内部有障碍物的管道。

在海底管道的修补方面,日本已经取得从管道内部补焊的成功经验,不过从安全的角度来看,仍然期待着机器人技术的应用。

6) 其他

现在,国际热核反应实验堆(ITER)的堆内维护已经在相当程度上依赖机器人了。日本原子能研究所开发了被覆层保护机器人(参见本篇4.2节)和冷却管道焊接、切断、检查机器人。该类机器人采用YAG激光,既可

以焊接也可以切断,激光光束的传递系统采用光纤,以适应冷却管道的弯曲状态^[74]。

由于尺寸的限制,小口径管道的管道维护机器人不大容易实现,尽管现在已经有众多多样机被研制出来,非常期待它们能够在改善作业条件方面作出贡献,但要实现这一步目标还有赖于进一步开展各种研究^[45]。

下面列举几个例子。小型维护作业机器人(东芝)可以在垂直或弯曲的 1 in 管道内移动,利用高分辨率摄像头和多自由度微型机械手实现管内的检查和异物回收。在产业科学技术研究开发制度下的“微机械技术研究开发”计划设立了一个项目,开发了 $\phi 10\text{mm}$ 管道内部的自行走环境识别系统(东芝、电装、三洋电机),它能够接受微波提供的能量,实现无线移动并同时进行损伤和异物的图像检查^[75,76]。

在管内机器人研发的同时,沿管道外表面移动的机器人也在研究中。例如,可以跨越法兰和 T 字形接头的跨骑在管道上的姿态可重构机器人、尺蠖机器人等^[77,78]。

图 1.60 所示的并联机器人也属于管外移动机器人。

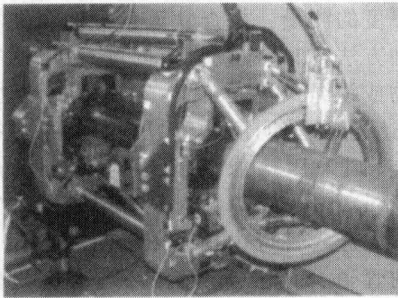


图 1.60 并联管道检查机器人
(諏访东京理科大学)

该机器人由移动载体和操作手 2 个部分组成,操作手安装在移动载体的前部,前端安装诊断传感器,通过 6 个移动关节的行程伸缩可以改变传感器固定部位的姿态。移动载体包括 2 个外圈(上面搭载的操作手可沿管道移动)和与之连接的并联机构(有 6 根带有移动关节的杆件与外圈连接),移动关节伸缩

即可以使机器人移动并通过弯头。

市川 诚 细贝英实

1.3.6 ITS

1. ITS 概述

所谓 ITS(Intelligent Transport Systems, 智能公路交通系统)就是利用电子和信息通信技术,在人-车-道路之间建立起智能化、网络化,解决汽车交通的各种问题的新型交通系统。它要解决的具体问题是交通事故和拥堵,以达到安全、快捷、舒适、改善环境、节能的目标,也就是运用各种技术手段从根本上解决目前公路交通存在的问题。20 世纪 90 年代后期,ITS 的概念从人、物、公路交通扩展到机场、铁路、船舶等,总之是以诸多交通工具的移动路线为对象构成一个庞大的交通系统^[79~81]。

美国的 ITS 包含 6 种^[82]分类,如表 1.8 所示。ITS 本身反映了社会系统的一个侧面。

表 1.8 美国 ITS 的系统分类

系 统	系统实例
ATMS(Advanced Traffic Management Systems, 先进交通管理系统)	信号控制、ETC (Electronic Toll Collection)
ATIS (Advanced Traveler Information Systems, 先进交通信息服务系统)	导航系统
AVCSS (Advanced Vehicle Control and Safety Systems, 先进车辆控制安全系统)	驾驶支援、自动驾驶
CVO(Commercial Vehicle Operations, 商用车运营系统)	商用车运行管理
APTS(Advanced Public Transportation Systems, 先进公共交通系统)	公共交通机构信息化
ARTS(Advanced Road Traffic Systems, 先进道路交通系统)	地区、车站所在地的 ITS

1996 年,日本的 ITS 建制是 5 省厅(警察厅、通商产业省、运输省、邮政省、建设省,目前已改为警察厅、经济产业省、总务省、国土交通省),确认了表 1.9 所示的推进 ITS 的 9 个领域,一共 20 个应用范围^[83]。

表 1.9 日本 ITS 系统机构的 9 个领域和 20 个应用范围

开发领域	应用范围
1. 导航系统智能化	(1) 交通相关信息的提供 (2) 目的地信息提供
2. 自动票务收费系统	(3) 自动票务收费
3. 安全运行支援	(4) 行走环境信息提供 (5) 危险警告 (6) 辅助驾驶 (7) 自动驾驶
4. 交通的优化管理	(8) 交通流量的优化管理 (9) 发生交通事故时的交通管制信息提供
5. 道路管理的效率化	(10) 维持管理工作的效率化 (11) 特殊车辆等管理 (12) 通行管制信息提供
6. 公共交通支援	(13) 公共交通信息提供 (14) 公共交通的运行和运行管理支援
7. 商用车辆效率化	(15) 商用车运行管理支援 (16) 商用车的连续自动驾驶
8. 步行人员等支援	(17) 行路指南 (18) 危险防范
9. 紧急车辆运行支援	(19) 紧急时刻的自动驾驶 (20) 紧急车辆路线指南和救援活动支援

既然 ITS 与上述系统和应用领域相关, 因此它所涉及的学科领域非常广泛。例如, 汽车工程、交通工程、土木工程、控制工程、信息通信工程、电工电子工程、机械工程、人机工程、心理学等, 而且需要在学科之间进行交叉, 展开深入的讨论。

当然, ITS 与机器人工程学之间也存在着密切的联系, 以表 1.8 中的 AVCSS 系统, 或者以表 1.9 中的安全运行支援为例, 它们都涉及为驾驶者提供“自动驾驶”服务的内容, 这显然离不开移动机器人智能技术和自主技术方面的研究开发。

2. 自动驾驶的历史

ITS 一词最早是 1994 年在巴黎召开的第一届 ITS 世界会议上提出的, 其目的在于强调一种新的系统概念。实际上, 早在 1939—1940 年的纽约世界博览会上就已经有了自动驾驶的提法, 并且曾经一度尝试过为自动驾

驶提供交通信息, 因此 ITS 思想可以追溯到 20 世纪的 50 年代。下面就先将自动驾驶系统与机器人工程学的历史渊源部分作一些简单的归纳^[81,84]。

在 ITS 的研究中, 与自动驾驶有关的研究历史很长, 从 20 世纪 50 年代末期到 60 年代, 美国、英国、德国和日本等国都开展过利用埋设在道路中的导航电缆实现转向控制的研究。

到了 20 世纪 70 年代, 日本开始了利用机器视觉的自主型自动驾驶的研究, 1977 年, 世界上第一台利用机器视觉驾驶的智能汽车在机械技术研究所(现产业技术综合研究所)开发成功^[85](图 1.61)。其后又陆续开展了包括障碍物回避在内的各种自主运行的研究。在美国, 大约在 20 世纪 80 年代前期, 开发了陆军无人侦察自动驾驶车 ALV^[86], 此后 NavLay^[87] 等将研究进一步深化, 转入卡车、乘用车、公共汽车等自动驾驶系统。德国在 20 世纪 80 年代中期把高速机器视觉用于自主行走车辆 VaMoRs^[88] 的研究, 此后又将其用于轿车自动驾驶。20 世纪 80 年代后期, 除上述成果外, 日本、美国及欧洲的大学、企业、研究所纷纷开展了各种自动驾驶的研究, 成为随后 ITS 计划的推动力。



图 1.61 世界第一辆基于机器视觉的智能汽车 (右前方上下有两台电视照相机)(机械技术研究所)

20 世纪 80 年代后半期, 各国都开始实施 ITS 计划, 沿着 ITS 的概念开展自动驾驶系统的研究和开发。下面介绍其中几项主要的计划。欧洲的 PROMETHEUS (Programme for a European Traffic with Highest efficiency and Unprecedented Safety) 计划 (1986—1994 年) 在大型轿车上安装 18 台电视摄像机开发了 VITA~II^[89], 已达到自动驾驶变更行车车道的水平, 其中包括车道保持、冲撞回避、安全确认等。在它的后续计划中, 又开发了 Chauffeur, 旨在开展卡车编队(列队)自动追

踪的研究。

在美国,从1997年8月开始依托AHS(Automated Highway System,自动化公路系统)计划推进了大规模的自动驾驶演习。7个车队参加了演习活动,涉及各种技术。其中之一有来自加利福尼亚州的PATH(Partners for Advanced Transit and Highway)车队行走。演习利用埋设在道路上的磁性标志、车间距雷达、车与车之间的通信,进行了一组8辆轿车以速度96km/h、间距6.3m列队行驶的实验^[90],目的在于探索增加道路容量的措施。此后,美国的有关部门作出了自动驾驶在短期内还无法直接产业化的判断,因此重新部署了后续的研究安排,由国家计划的形式转向驾驶支援技术的研究开发。

在此期间日本也实施了各种计划,本节特别举出一个与AVCSS相关的研究活动。在自动驾驶道路系统计划中,日本开展了利用道路车辆之间的通信、磁性标记、激光雷达、光学通信等的队列行驶研究^[91],1996年秋季在上信地区高速公路的一段尚未开通的路段上进行了公开实验。此后开发了行驶支援道路系统(AHS: Advanced cruise-assist Highway Systems)。2000年冬季,AHS计划与ASV(Advanced Safety Vehicles)计划共同举办了一场大规模的研究成果公开展示活动,称之为“Smart Cruise 21 Demo 2000”^[92]。ASV计划进行的第一期(1991—1996年)和第二期(1996—2001年)致力于以预防安全为目的的驾驶支援计划研究。目前处于该计划的第三期(2001—2006年)。根据自1990年以来的调查资料,SSVS(Super Smart Vehicle System)计划开展了车辆之间通信并以此进行协调行驶的研究。2000年11月末实现了5台自动驾驶车辆的编队、障碍物回避等内容的软协调行驶^[93](图1.62),也就是所谓的“Demo 2000协调行驶系统”。车队的行驶以汽车的交通安全和运行效率并重为目的,显然这是车辆之间进行通信的关键技术之一。

从上面简述的自动驾驶的概况可以看到,其研究呈现出以下特点:从一辆车的单独自动驾驶发展到多辆车之间的队列行驶,以及协调行驶。相关的公路设备也在向自主甚至是多用途方向发展,其中通信技术起到重要作用。包括自动驾驶技术在内,驾驶支援

系统的研究应用普遍受到关注。我们有理由期待,随着AVCSS技术的研究、开发、普及和发展,交通问题能够从本质上得到解决。

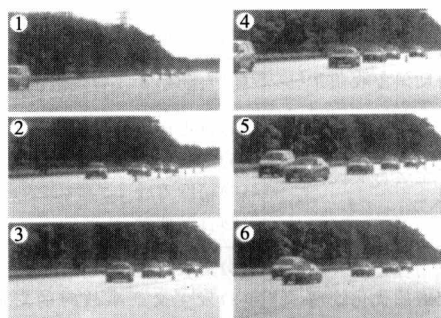


图1.62 基于车辆间通信协调行驶的障碍物回避(领头车采用激光雷达检测障碍物并发出回避动作)(机械技术研究所)

3. AVCSS的基本技术

如前面所述,支持AVCSS和ITS的技术领域涉及很广。自20世纪90年代末期到21世纪初,各种学会的学术刊物都出版了与ITS技术或相关技术有关的专刊^[94~99]。在这里特别就与AVCSS相关的基本技术作一些介绍。如图1.63所示,AVCSS的基本技术有传感、通信、控制、信息处理、人机对话接口(HMI)等,它们彼此之间又有密切的关联。当然,在这些技术之中有不少基本技术与机器人技术重叠的地方,它们彼此可以共通。

考虑到与机器人的关联性,我们在这里挑出传感和通信两项技术重点加以介绍^[100]。

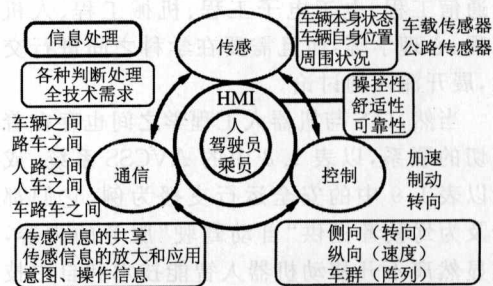


图1.63 AVCSS的基本关键技术

传感相当于驾驶员的认知,即检测和辨识对象。对象包括车辆自身的状态、车辆自身的位置、周围环境,传感是事关安全的重要功能。车辆自身状态包括速度、加速度、角速度、加减速的大小、转向角度等,这些数据通过编码器、加速度传感器、陀螺仪等检测手段

都可以直接得到。车辆自身的位置包括两个参数:一个是指为了防止车辆逃逸和车道跟踪所必须识别的特定车道上车辆的位置;另一个是指为了选择路径和掌握周围车辆的位置所必须识别的包含目的路径在内的广域位置。识别车辆自身位置的传感器和系统的例子如表 1.10 所示。至于方法则有基本设施协调法(通过车载传感器检测指示路面位置的各种参照物)和自主导航法(用机器视觉法或陀螺仪、GPS(Global Positioning System,全球定位系统)等进行检测)。

表 1.10 识别车辆自身位置的传感器和系统

	路面参照线	车载传感器	系统举例
基本	感应电缆	感应线圈	20 世纪 60 年代的自动驾驶
	感应条带	感应线圈	无人搬运车、无人割草机
设施协调法	磁性路线标志 • 磁钉 • 磁片 • 磁带 ※符号化磁性标志序列	磁性传感器	AHSRA、PATH AHSRA 3M PATH、埼玉大学
	※无线电式路线标志 • 中、长波调制反射 • 中、长波共振反射 • 微波物理反射	雷达	AHSRA(含信息提供) AHSRA 俄亥俄州州立大学
自主法	路线标志(白线等)	机器视觉	智能汽车(机研所) NavLab(CMU) VavMoRs(慕尼黑国防大学)、富士重工、日产等
	※(数字地图)	GPS、陀螺仪、车速传感器等	东京大学、SFV(产业技术综合研究所)等

注:※标记表示可以实现广域位置识别。

利用各种传感器还可以识别周围的环境状况^[101,102]。车辆周围局部状况的检测包括测量行驶障碍物的激光雷达、毫米波雷达、图像处理系统、红外线摄像头、超声波传感器等,它们不仅可以用于车辆前方的检测,也可

以用于侧面和后方的检测。还有 ACC(Adaptive Cruise Control),它不但可以检测障碍物,也可以检测前方车辆的距离和加速度的差值。除了车载传感器外,也可以在道路两侧设置传感器,为路面上车辆之间的通信提供信息。为此,有人开发了行驶支援道路系统(AHS),并得到实验验证^[103]。

在识别位置和状况的传感技术研发方面,为了解决存在巨大差异的环境、分辨率、检测范围等课题,今后除了开展单个传感器系统的研究外,多传感器信息融合技术的研究会越来越受到关注,它将成为提高传感器的可靠性、改善实时性、降低成本的关键技术。

对于驾驶员来说,通信使他的认知范围和精度得到放大,是关系到驾驶效率的重要功能。下面看一下车载通信装置的问题,这属于移动物体通信的一部分。与其他移动物体通信相比,我们这里特指 ITS 移动物体通信,其特点是信息与接收信息的用户存在位置方面的关联(position dependent services)。

ITS 通信技术的分类也是多种多样的^[104]。下面按照通信的对象进行分类,介绍具有代表性的路-车之间的通信和车-车之间的通信。1996 年以后,VICS(Vehicle Information and Communication Systems)投入运营,它属于路-车之间的一种通信系统,可以为驾驶员提供交通拥堵等信息。通信的方式有两种共同存在:一种属于广播型,采用 FM 多波段广播;另一种属于局域型,采用无线电信标(2.5GHz)或光标(红外线)。目前,正在推行的 ETC(Electronic Toll Collection(5.8GHz),自动票务收费系统)属于无线电信标的点对点双向通信。

车-车之间的通信是指某一车辆与其周边区域车辆之间的通信,属于特定场所和特定对象的通信。车-车之间通信的作用在于信息提供、驾驶支援、自动驾驶等^[105]。驾驶支援用系统有效地利用传感器提供的位置识别信息的环境状况识别和防止十字路口发生冲撞的系统。

至于自动驾驶的通信,包括车群行驶和分流-合流协调行驶系统^[106]。根据不同的用途,目前车-车通信研究所采用的频率和传输方式也多种多样。不同用途的车-车通信的共

同重点在于谋求高可靠性、实时性、自主分散性、网络时变性等。

对于位置关系不断发生变化的车辆来说,与非特定对象保持自主通信的网络技术显得尤为重要。因此,有人提出了可柔性应对车辆拓扑变化的车-车通信协议 DOLPHIN (Dedicated Omni-purpose Inter-vehicle Communication Linkage Protocol for Highway Automation)^[107]。

信息处理相当于驾驶员的判断,它包括从传感获得认知信息,从通信获得路径信息,以及目标时间、交通规则信息等,由此预测操作后出现的状态、情况,以及如何向目的地行驶,同时还应该按照安全和效率的原则作出操作功率的判断。

控制则相当于驾驶员的操作,对于汽车来说主要的操作有3个基本动作:拐弯、行驶、停车。它们对应于由信息处理作出操作动作的判断后,实现侧向(转向)控制、纵向(速度)控制。如果是面对车群,还应该进行轮班领队和协调列队行驶控制等问题的研究。评价控制的标准主要是平稳性和舒适性。

HMI对与人类有着密切关系的驾驶支援系统来说是一项非常重要的技术,对AVCSS来说更是如此。利用传感技术的商品已经出现在市场上。不过,如果传感器或通信设备所提供的信息或驾驶支援是支离破碎的、冗余的,反而会让自动驾驶举步维艰。从这一意义上讲,现实中最值得期待的HMI在体系结构上应该可以扩展,在数据融合和系统集成方面具有优良的性能。在通向实用化的进程中,AVCSS除了仍然面临设备和系统可靠性等方面的技术课题外,同时还必须解决驾驶员和社会的接受程度的问题,普及推广的机制问题,以及万一发生事故时的责任和制度等一系列问题。

在这里列举一些自动驾驶与机器人技术的不同之处。在感知方面的区别是环境和状态变化的多样性;在通信方面的区别是网络的时变性和实时性;在控制方面的区别是精度和实时性、稳定性;在信息处理方面的区别是信息量和实时性;在HMI方面的区别是状况数目、信息量、舒适性等。总之,两者在上述的方方面面中多少存在着差别,不过显然,

两者的关联性也是无法切割的。

4. 结 论

至此,本章就ITS的概况、自动驾驶的历史、AVCSS的关键技术等分别进行了介绍,这些技术与机器人技术之间有着密切的关系,可以间接地进行借鉴和应用。

此外,人们还直接将一些机器人技术移植到对汽车操纵平稳性和寿命的评价研究中,尽管它们与ITS并没有什么直接的关系。这些研究是,有效利用机器人的驱动器、操舵机器人的精确再现性、连续性和耐久性进行实验评价,因此目前已经有数种商品化的机器人系统。

有关机器人在这一领域中的应用展望,还有各种概念设想。例如,应用拟人机器人的辅助驾驶机器人、残疾人辅助驾驶机器人、车辆跟踪驾驶机器人、代驾-自动驾驶机器人等^[108]。如果在生活支援领域机器人的应用有所进展,人类与机器人能够实现协调和共存,那么上面列举的这些机器人就未必是梦想了。

跨入21世纪后,人们越发认识到在ITS的研究中协调这个关键词所起到的重要作用。可以预言,今后有关车-车之间,进而在路-车、人-车、人-路之间的协调研究会越来越深入。随着以人、物、移动手段、移动路径为对象的交通系统的研究的深入开展,一旦实现了上述目标,那么ITS必将为我们身边的社会带来巨大的改变,会大大改善人类的生活。实现这一目标与技术有密切的关系,研究人员之间的交流对各项技术的进展都是不可或缺的。

加藤 晋

1.3.7 电影与机器人技术

电影产业在娱乐产业中占有非常重要的位置,从电影衍生出多种商品和主题公园。

据记载,电影中的SFX(special effects 电影特技)在电影产业的萌芽期就已经有了,如背景的修绘(matte-paintings)、模型布景、木偶(puppet)等。各种获得影像效果的器材、宽银幕画面合成技术等也应运而生。到20世纪末期,高速计算机又催生了CG(Computer Graphics)及其融合技术,所制作的CG影像

甚至能达到以假乱真的效果。

在影像制作过程中,被摄物体、摄影技巧、灯光等固然是非常重要的因素,而机器人技术在被摄物体和摄影器材两个方面都有应用^[109~111]。

1. 被摄物体

电影中有两种场合机器人以被摄物体的形式出现在镜头上:一种场合是机器人充当角色;另一种场合是机器人以另外的姿态呈现出来,观众从形态上看不一定明白它是机器人。

举例来说,前一种场合有演员穿着机器人形状的特殊装束表演,利用机器人形状的木偶表演,还有像电影“*Short Circuit*”(1988年,TRI-STAR Pictures, Inc.)那样用真正的机器人进行表演。

后一种的代表是所谓的动画电子学(animatoronics)。它结合摄影技术弥补动物演技低下或早已灭绝的动物的动作,达到以假乱真的视觉效果。为了使表演者实现电影场景所必需的动作和外貌,其内部必须有骨骼、关节、电机、液压或气动等动力装置,并用硅胶或发泡塑料做成皮肤。根据导演的要求,也许电影中只能出现半身像、特写等,总之应该按照场景来制作必要的功能,甚至多个模型。影片“*Jurassic Park*”(1993年,Universal)就制作了一个重达4t、身长12m的液压驱动的T-rex,它采用主从控制方式进行操作。为了使如此庞大的机械道具不伤害共同参演的人员,在操作过程中必须格外注意安全。

2. 摄影器材

SFX的目标就是向观众展现自然画面,而不感觉技术的存在。尽管CG已经被广泛采用,不过为了使观众感觉不到CG图像与实物的差别,机器人技术仍然是不可或缺的。

摄影技术是通过影像将事物传递给观众的表现手法。摄影技术包括被摄对象的位置、角度、尺寸等三个要素,与镜头的选择有着很大的关系。另外,灯光与摄影技巧同等重要,它包括灯光位置控制、亮度控制、色温等多个要素。

摄影技术中操作摄影机本体的主要动作有以下几种:摇摄(沿摄影机镜头方向水平移动)、俯仰(沿垂直方向的移动)、移动跟随拍摄(摄影机与被摄对象之间距离的改变)、动

拍镜头(镜头相对于被摄对象进行横向移动,或者以某一个点为中心旋转切入)、移转拍摄(长臂前端安装摄像机,通过移动改变摄像机与被摄对象的各种位置)。自从在影片“*Star Wars*”(1977年,20th Century Fox)中采用Dykstraflex system以来,它在复杂摄影技术的控制方面一直扮演着重要的角色。

3. CG

自20世纪80年代以后,CG被引入电影技术,结果它成功地使早已灭绝的生物在影片“*Jurassic Park*”中自然地展现出来。

CG动画制作中借助于虚拟摄影机拍摄在虚拟舞台上表演的物体,它也存在如何运用摄影技巧和灯光的问题,所以在制作时应该精心设计,使它们的写实镜头合成得自然流畅。CG的3D场景最终通过透视图得到2D图像或影像,进而得到与电影或电视剧所一一对应的每一幅图像。然后,在计算机上将扫描仪读取的实际影像仔细地与CG制作的图像进行合成和编辑,消除不自然的感觉,最后制成拷贝。

CG动画中的人物的性格通过键盘输入数值即可完成,非常简便。在影片“*Jurassic Park*”的制作过程中,开发了一套输入装置被称为“Dinosaur Input Device”,它有恐龙骨骼的仿真结构,而且各个关节都装有编码器。可见,在CG的人机交互中机器人技术仍然占有重要地位。

上述技术不仅在电影中得到应用,在主题公园编排的各个项目中也得到了广泛应用。例如,其中有一种叫做飞行模拟器,它将画面和Stewart platform(属于一种并联机器人平台)或双悬臂结构结合起来表演节目,由于能够产生视觉信息和体感信息交融的效果,已经成为互动型娱乐的核心技术。

市川 诚

参考文献

1.1 第一产业

- [1] 岡本, 白井, 藤浦, 近藤: 生物にやさしい知能ロボット工学, 実教出版(1992)
- [2] T. Fujiura, N. Kondo, M. Monta, H. Murase, T. Okamoto, F. Sevilla, Y. Shirai and K. C. Ting (eds. N. Kondo and K. C. Ting): Robotics for Bio-production Systems, American Society of Agricultural Engineers (1998)

- [3] 行本, 木谷, 近藤, 藤浦, 岡本, 福森 (執筆順): 特集“大地とロボット”のうち農作業関連のもの, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.7 (1994) pp.25-52
 - [4] 土肥, 藤浦, 中尾, 岩尾, 竹山: 野菜用多機能ロボットの研究 (第2報), 農業機械学会誌, Vol.56, No.2 (1994) pp.101-108
 - [5] 佐藤, 竹永, 芋生: イチゴ収穫ロボットの開発, 第55回農業機械学会年次大会講演要旨 (1996) pp.243-244
 - [6] 近藤, 門田, 久枝: 内成り栽培用イチゴ収穫ロボット (第2報), 植物工場学会誌, Vol.13, No.4 (2001) pp.231-236
 - [7] 永田, 槐島, 日吉, 中島, 大津: イチゴの収穫システムの開発に関する研究 (第1, 2報), 第60回農業機械学会年次大会講演要旨 (2001) pp.235-238
 - [8] 有馬, 門田, 難波, 吉田, 近藤: 高設栽培用イチゴ収穫ロボット (第2報), 植物工場学会誌, Vol.15, No.3 (2003) pp.162-168
 - [9] S. Arima and N. Kondo: Cucumber harvesting robot and plant training system, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.11, No.3 (1999) pp.208-212
 - [10] スプラタ, 藤浦, 山田, 檜田, 湯川, 中尾: 三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット (第1報), 農業機械学会誌, Vol.58, No.4 (1996) pp.45-52
 - [11] 韓, 藤浦, 山田, 石東, 北村: エンドエフェクタに三次元視覚センサをもつミニトマト収穫ロボット, 農業機械学会誌, Vol.62, No.2 (2000) pp.118-126
 - [12] 丁, 藤浦, 石東, 土肥, 上田: ロボットによる結球野菜の選択収穫の研究 (第4報), 農業機械学会誌, Vol.62, No.2 (2000) pp.111-117
 - [13] 村上, 大塚, 井上, 杉本: キャベツ収穫ロボットの開発 (第1, 2報), 農業機械学会誌, Vol.61, No.5 (1999) pp.85-100
 - [14] 岡本, 趙, 實山, 鳥居, 芋生: サトウキビ培養苗増殖ロボットに関する研究, 農業機械学会誌, Vol.60, No.6 (1998) pp.71-77
 - [15] 崔, 土肥, 石東: 花卉・野菜苗精密管理ロボットの開発 (第1報), 農業機械学会誌, Vol.66, No.2 (2004) pp.68-75
 - [16] 鈴木, 小林, 猪之奥, 三浦, 平田: ウリ科野菜用接ぎ木装置の開発 (第1報), 農業機械学会誌, Vol.57, No.2 (1995) pp.67-76
 - [17] 大越, 瀬井, 輪竹, 波多, 多田ほか: 施設園芸と接ぎ木苗生産技術特集, アグリビジネス, Vol.11, No.45 (1996) pp.21-82
 - [18] 三代: 施設園芸のロボット化, メーカーにおけるロボット開発事例 (2), 96施設園芸新技術シンポジウム, 施設園芸協会ほか (1996) pp.1-4-1-8
 - [19] 西浦, 穂波, 平: 接ぎ木苗生産の機械化に関する研究 (第1報), プラグ・イン法の提案, 農業機械学会誌, Vol.60, No.6 (1998) pp.35-43
 - [20] 野附: 全自動搾乳機 (農林水産技術会議事務局研究成果, 搾乳作業の省力化に関する研究, No.144 (1979) pp.156-182
 - [21] 市戸: 搾乳ロボット開発研究の現状と展望, 農業機械学会誌, Vol.60, No.6 (1998) pp.138-142
 - [22] 平田: 繋ぎ飼い牛舎における搾乳の自動化, 農業機械学会誌, Vol.60, No.6 (1998) pp.152-154
 - [23] 自走式自動植付機: 平成14年度森林環境保全機械化推進事業報告書, 林業機械化協会 (2003) pp.35-9
 - [24] 育林用林業機械急傾斜地タイプ: 機械化林業, No.527 (1997) pp.55-6
 - [25] 自走式下刈機: 機械化林業, No.571 (2001) pp.7-8
 - [26] 自律分散型育林機械: 機械化林業, No.548 (1999) pp.6-9
 - [27] 小型地形対応式育林機械: 機械化林業, No.583 (2002) pp.3-4
 - [28] 環境低負荷型育林機械: 平成14年度森林環境保全機械化推進事業報告書, 林業機械化協会 (2003) p.9-34
 - [29] 自走式枝打ち機: 機械化林業, No.571 (2001) pp.8-9
 - [30] 続・伐出作業を革新するプロセッサ・ハーベスタ, 林業機械化協会 (2001)
 - [31] 藤田征作ほか: 魚類種苗量産過程の自動化, 省力化にむけての考え方の一例と, その施設設計への応用, 栽培技研, Vol.11, No.2 (1982) pp.1-8
 - [32] 日本栽培漁業協会40年史, 日本栽培漁業協会 (2003) p.99
 - [33] 日本栽培漁業協会40年史, 日本栽培漁業協会 (2003) p.101
 - [34] 福永恭平: 機器, 装置等の開発 (自動底掃除機の開発), 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和61年度) 日本栽培漁業協会 (1988) p.391
 - [35] 川島昭二: 北海道戸井町における大規模コンブ増殖場の造成, 新版つくる漁業, 農林統計協会 (1976) pp.240-250
 - [36] 「養殖」臨時増刊: 省力化実践ガイド, 緑書房 (1998)
 - [37] 中村充: 内湾型海洋牧場 (下), 水産の研究, Vol.6, No.4 (1987) pp.105-107
 - [38] 沿岸漁場造成技術開発研究会: 平成8年度自然エネルギー利用型増殖等高度化システムの開発に関する報告書, MF 21 (1998) p.369
- ### 1.2 在建筑业中的应用
- [1] 上野高敏, 野中稔, 吉田哲二, 平林裕治: 耐火被覆吹付作業用ロボット SSR-3 の開発, 第1回建築施工ロボットシンポジウム論文集, 日本建築学会材料施工委員会 (1987.1) pp.25-30
 - [2] 平林裕治, 野中稔, 吉田哲二, 上野高敏: 建築施工ロボットへの作業の指示方法について, 第1回建築施工ロボットシンポジウム論文集, 日本建築学会材料施工委員会 (1987.1) pp.67-72
 - [3] 新井一彦, 山田文三, 斎藤実, 坂野弘一: コンクリート床直仕上げロボットの開発—2号機開発の検討内容と施工実績—, 第1回建築施工ロボットシンポジウム論文集, 日本建築学会材料施工委員会 (1987.1) pp.7-12
 - [4] 新井一彦, 山田文三, 斎藤実, 坂野弘一: コンクリート床直仕上げロボットの開発 (第4報) 一直仕上

- げ作業のシステム化施工一, 第2回建築施工ロボットシンポジウム予稿集, 日本建築学会材料施工委員会 (1988.1) pp.61-66
- [5] 新井一彦, 渡辺純一, 亀田正夫, 片野彦一, 時岡誠剛: 建築施工ロボットの現在一開発体制ならびに適用の実態 (連載第5回)一, 施工, 彰国社 (1997.5) pp.164-167
- [6] 奥山信博, 前田純一郎, 本田忠義: 鉄骨自動建方システムの開発一自動玉掛け外し装置と大梁建方ロボットの適用と実績, 第2回建築施工ロボットシンポジウム予稿集, 日本建築学会材料施工委員会 (1988.1) pp.103-108
- [7] 斎藤実, 新井一彦, 毛利行男, 坂野弘一: 建築工事の高度化をめざした建築用ロボットの開発, ロボット, 日本産業用ロボット工業会誌, No.58, (1987.6) pp.30-37
- [8] 西村正宏: ジャイロによる吊荷の方位角に関する基礎的研究, 第2回建築施工ロボットシンポジウム予稿集, 日本建築学会材料施工委員会 (1988.1) pp.19-24
- [9] 新井一彦: ロボット, コンクリート技術の要点, 日本コンクリート工学協会 (1977) pp.291-295
- [10] 日本建築学会材料施工委員会建築生産自動化小委員会: コンストラクション オートメーションー建築施工自動化の現状と将来展望一, 日本建築学会 (2001.8) pp.101-131
- [11] 新井一彦: 建設ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.107 (2000.10) pp.919-922
- [12] 国土交通省: 平成15年版国土交通白書, 国土交通省 (2003)
- [13] 日本建設機械要覧 (2001年版), 日本建設機械化協会 (2001.3)
- [14] 大林ほか: 地盤工学分野における自動化施工と制御技術の現状, 土と基礎, Vol.48, No.10 (2000) ~Vol.49, No.4 (2001)
- [15] 建設機械用語集, 日本建設機械化協会 (1997)
- [16] 建設ロボット自動化技術便覧 (1995年版), 先端建設技術センター (1995)
- [17] 三垣, 納見, 野田: シールド自動化による急速施工, 建設の機械化, No.590 (1999.4)
- [18] 小林, 佐藤, 太田, 澤: センターポール式深礎掘削工法, 建設の機械化, No.621 (2001.11)
- [19] 廣田, 河野, 土山: 箱桁塗り替え用塗装ロボットの開発, 建設の機械化, No.624 (2002.2)
- [20] 吉田ほか: 超遠隔制御システムー雲仙普賢岳赤松川除石工事一, 建設の機械化, No.608 (2000.10)
- [21] 緊急時の無人化施工ハンドブック, 先端建設技術センター (2001)
- [22] 佐藤, 吉永: 遠隔操縦ロボットの開発, 建設の機械化, No.609 (2000.11)
- [23] 西尾: 有珠山の無人化施工による泥流対策工事, 建設の機械化, No.608 (2000.10)
- [24] 日本建設業団体連合会ほか: 建設業ハンドブック 2003
- [25] 土木学会建設用ロボット委員会: 21世紀における建設工事の自動化・ロボット化への展望 (建設用ロボットの普及・発展を目指して) 研究報告書, 土木学会 (2001)
- [26] 日本建設機械化協会技術部会自動化委員会: 建設機械の自動化・ロボット化ー平成8年度調査報告書ー建設の機械化, No.573 (1997.11)
- 1.3 在第三产业中的应用**
- [1] 特集 “アミューズメントロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3 (1990.6)
- [2] 特集 “21世紀の玩具とロボティクス”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000.3)
- [3] Masahiro Fujita and Koji Kageyama: An Open Architecture for Robot Entertainment, The First International Conference on Autonomous Agents (1997) pp.435-440
- [4] 横山, 玉井ほか: 小児病棟における4足歩行型ロボット (AIBO) による RAA (ロボット介入活動) の試行, ヒトと動物の関係学会第7回学術大会予稿集 (2001) p.40
- [5] 柴田崇徳: 人の心を癒すメンタルコミットロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3 (1999) pp.943-946
- [6] Masahiro Fujita: AIBO: Toward the era of digital creatures, The International Journal of Robotics Research, Vol.20, No.10 (2001.10) pp.781-794
- [7] 田島, 斎藤, 柴田: 猫ロボットのインタラクションによるユーザー評価と考察, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1999)
- [8] 柴田崇徳: 人とロボットの身体的インタラクションを通した主観的価値の創造, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.42-45
- [9] 藤田善弘: パーソナルロボット R 100, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2 (2000) pp.198-199
- [10] Jin Satoh and Joe Nagata: LEGO Mindstorm マスターへの道, オーム社 (2000)
- [11] 例えば, <http://www.jst.go.jp/rikai/robot/kit/index.html>
- [12] OPEN-R プログラミング SIG, C++ で AIBO を自在に動かす, インプレス (2002)
- [13] 例えば, <http://www.symbio.jst.go.jp/PINO>
- [14] Hirukawa et al.: OpenHRP: Open Architecture for Humanoid Robot Platform, Proceedings of International Symposium of Robotics Research (2001)
- [15] H. Kitano et al.: RoboCup: The Robot World Cup Initiative, Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (1997) pp.340-347
- [16] A. Birk et al. (eds.): RoboCup-2001: Robot Soccer World Cup V, Springer-Verlag (2002)
- [17] 例えば, <http://www.robo-one.com>
- [18] 例えば, <http://robotwars.com>, <http://www.battlebots.com>
- [19] Robin R. Murphy: Introduction to AI Robotics, The MIT Press (2000)
- [20] Ronald C. Arkin: Behavior-Based Robotics, The MIT Press (1998)
- [21] P. Ekman and W. V. Friesen: Unmasking the Face, Prentice-Hall (1975)

- [22] A.Takanishi: An Anthropomorphic Robot Head having Autonomous Facial Expression Function for Natural Communication with Human, The 9th International Symposium Robotics Research (ISRR) (1999) pp.297-304
- [23] Cynthia L. Breazeal: Designing Sociable Robots, The MIT Press (2002)
- [24] T. R. Halliday and P. J. B. Slater (eds.): Animal Behavior, Blackwell Scientific Publications (1983)
- [25] アイブル=アイベスフェルト著, 日高敏隆監修: ヒューマンエソロジー, ミネルヴァ書房 (2001); Masahiro Fujita et al.: Physically and Emotionally Grounded Symbol Acquisition for Autonomous Robots, Emotional and Intelligent II: Tangled Knot of Social Cognition (AAAI Fall Symposium Technical Report) (2001) pp.43-48
- [26] V. Gallese et al.: Action recognition in premotor cortex, Brain, Vol.119 (1996) pp.592-609
- [27] アントニオ, R. ダマジオ: 生存する脳, 講談社 (2000)
- [28] 藤田雅博: ロボットエンターテインメントと人工知能, 人工知能学会誌, Vol.16, No.3 (2001) pp.399-405
- [29] T. Ishida, Y. Kuroki, J. Yamaguchi, M. Fujita and T. T. doi: Motion Entertainment by a Small Humanoid Robot Based on OPEN-R, Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (2001) pp.1079-1086
- [30] 金本, 梶原, 堀井, 北澤, 袴田, 高田: 警備用移動ロボットによる人体・火災・の検出と自動消火, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1991) pp.347-350
- [31] 金本, 中村, 堀井, 高田, 真島: 警備用移動ロボットによる異常熱源の検出と識別, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1992) pp.903-906
- [32] Shigeki Iida and Shinichi Yuta: Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots, Proceedings of International Workshop on Intelligent Robots and Systems (1991) pp.212-217
- [33] 袴田, 金本, 堀井, 高田, 真島: 自律移動型ロボットの警備分野への応用, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1996) pp.143-144
- [34] Yoichi Shimosasa, Jun'ichi Kanemoto, Kazunori Hakamada, Hiroshi Horii, Takao Arika, Yuusuke Sugawara, Fumio Kojio, Akihiro Kimura and Shin'ichi Yuta: security Service System using Autonomous Mobile Robot, Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (1999) pp.IV 825-829
- [35] Yoichi Shimosasa, Jun'ichi Kanemoto, Kazunori Hakamada, Hiroshi Horii, Takao Arika, Yuusuke Sugawara, Fumio Kojio, Akihiro Kimura and Shin'ichi Yuta: Some Results of the Test Operation of Security Service System with Autonomous Guard Robot, Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (2000) pp. 405-409
- [36] 最新技術百科 床面清掃ロボット, TRIGGER, No.5 (1987) pp.50-51
- [37] 鶴賀: 床面清掃ロボットにおけるセンサ, センサ技術, Vol.4, No.4 (1984) pp.52-56
- [38] 山上, 荒川, 高岡, 山田: 自律移動型掃除ロボット, 第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1989) pp.445-446
- [39] 小林, 藪内, 近藤, 江口: 掃除ロボットのインテリジェント化技術, システム/制御/情報, Vol.35, No.8 (1991) pp.473-480
- [40] Erwin Prassler et al.: A Short History of Cleaning Robots, Autonomous Robots, No.9 (2000) pp.211-226
- [41] 鈴木: ビッグバードから清掃ロボットが舞う, 月刊ビルクリーニング (1994.8) pp.10-25
- [42] 藪内: 家庭用掃除ロボットの開発, 電機 (JEMA) (2002.11) pp.32-35
- [43] 藪内, 江口, 高木, 乾, 小林: 移動ロボットの走行に及ぼす床面の影響と検出, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (1995) pp.899-900
- [44] 社会支援形ロボットの現状と展望, 電気学会技術報告, No.720, 電気学会 (1999)
- [45] 田口幹ほか: ユニット型小口径配管内走行検査ロボットの開発, JRSJ, Vol.15, No.2 (1997) pp.230-235
- [46] 藤原茂ほか: 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発, JRSJ, Vol.12, No.2 (1994) pp.318-327
- [47] 配管内部清掃ロボット, www.cxr.co.jp
- [48] 遠隔配管内面点検・修理ロボット, www.iic-hq.co.jp
- [49] 蒸気発生器伝熱管用超高速全自動 ECT システム, 三菱重工技報, Vol.37, No.3 (2000)
- [50] 復水器清掃検査ロボット, www.energia-pet.co.jp
- [51] 電力分野におけるロボット利用, 中部電力技術開発ニュース, No.55 (1993)
- [52] 武藤健司: 微粉炭管内面検査ロボットの開発, 中部電力技術開発ニュース, No.88 (2001)
- [53] 高水頭水圧鉄管路の水中点検ロボットの開発, 中部電力技術開発ニュース, No.46 (1990)
- [54] 岡田晃: 3次元曲面管路内面清掃点検ロボット, JRSJ, Vol.10, No.5 (1992) pp.604-605
- [55] 海水配管内清掃ロボットの開発, 中部電力技術開発ニュース, No.63 (1995)
- [56] 取水路清掃ロボット, www.energia-pet.com
- [57] 煙突点検ロボット, www.todenkogyo.co.jp
- [58] 拓殖ほか: 球形ガスホルダー供用中検査の自動化, 溶接技術, Vol.35 (1987)
- [59] 球形貯槽検査ロボット, www.oge.co.jp
- [60] 川口圭史ほか: 鉄管内走行ロボットの開発, JRSJ, Vol.14, No.1 (1996) pp.137-143
- [61] 配管内面溶接部検査ロボット, www.cxr.co.jp
- [62] 管内マルチロボット, www.osakagas.co.jp
- [63] 内面自動補強溶接ロボット, www.osakagas.co.jp
- [64] 都下水道局, ニュース東京の下水道, No.160 (1999)

- [65] 下水道管渠健全度ロボット, www.kidoh.co.jp
- [66] 下水道のエンジニアリング, 月報鹿島 (Aug., 2002)
- [67] カメラ・レーダ複合型管内探査システム, www.burn-am.com
- [68] 自走式穿孔ロボット, www.isico.or.jp
- [69] 光ファイバケーブル敷設ロボット, www.tgs-sw.co.jp
- [70] コンベクションチューブ検査ロボット, www.cxr.co.jp
- [71] ボイラ配管検査ロボット, www.ihico.jp
- [72] 煙突清掃ロボット, www.ihico.jp
- [73] 山岡誠治: 港湾設備の保全管理と海底配管の検査補修技術, 石油産業活性化センター (2003)
- [74] 角館聡ほか: ITERの遠隔保守技術, 検査技術, Vol.7, No.11 (2002) pp.28-33
- [75] 宮川豊美ほか: 1インチ用配管作業ロボットの開発, JRSJ, Vol.17, No.3 (1999) pp.389-395
- [76] 鶴田和弘ほか: 管内自走環境認識システム, JRSJ, Vol.19, No.3 (2001) pp.9-12
- [77] 細貝ほか: 自律型配管診断ロボットの研究 (第1報), 日本機械学会論文集, No.51-467 (1985)
- [78] 福田ほか: 自律型配管診断ロボットの研究 (第3報), 日本機械学会論文集, No.53-492 (1987)
- [79] 交通工学研究会編: ITS—インテリジェント交通システム, 丸善 (1997)
- [80] 高羽禎雄編著: 21世紀の自動車交通システム, 工業調査会 (1998)
- [81] 鎌田, 藤岡編: 自動車プロジェクト工学, 技報堂出版 (2001)
- [82] ITS America: ITS Strategic Plan for Intelligent Vehicle-Highway Systems in United States (1992)
- [83] 警察庁, 通商産業省, 運輸省, 郵政省, 建設省: 高度道路交通システムに係わるシステムアーキテクチャ (1999)
- [84] 津川: 自動車の自動運転システム, 人工知能学会誌, Vol.14, No.4 (1999) pp.606-614
- [85] 谷田部ほか: ビジョンシステムをもつ車両の自律走行制御, 計測と制御, 総合論文, Vol.30, No.11 (1991) pp.1014-1028
- [86] R. Terry et al.: Obstacle avoidance on roadways using range data, SPIE, Vol.727, Mobile Robots (1986)
- [87] C. Thorpe et al.: Vision and Navigation, The Carnegie Mellon Navlab, Kluwer Academic Publishers (1990)
- [88] V. Graefe: Vision for Intelligent Road Vehicles, Proc. Intelligent Vehicles '93 Symposium (1993) pp.135-140
- [89] B. Ulmer: VITA II-Active Collision Avoidance in Real Traffic, Proc. the Intelligent Vehicles '94 Symposium (1994) pp.1-6
- [90] K. S. Chang et al.: Automated highway system experiments in the PATH program, IVHS Journal, Vol.1, No.1 (1993) pp.63-87
- [91] 上田ほか: 自動運転道路システムの開発, 電気学会道路交通研究会, RTA-96-13 (1996)
- [92] 保坂: スマートクルーズ 21, 自動車技術会 2001 年春季大会, 20015084 (2001)
- [93] 津川ほか: デモ 2000 協調走行概要, 電子情報通信学会技術研究報告 ITS 研究会, ITS-2000-45 (2001) pp.19-24
- [94] ミニ特集 先進安全自動車 (ASV) における計測・制御技術, 計測と技術, Vol.36, No.3 (1997) pp.163-197
- [95] 特集 高度道路交通システム, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3 (1999) pp.311-355
- [96] ITS 小特集, 電子情報通信学会学誌, Vol.83, No.7 (2000) pp.527-568
- [97] 特集 車をとりにくく情報と安全, 自動車技術, Vol.55, No.11 (2001) pp.4-60
- [98] 特集 21世紀の自動車と電気工学, 電気学会誌, Vol.122, No.6 (2002) pp.354-373
- [99] 特集 インターネットと自動車, 情報処理, Vol.43, No.4 (2002) pp.349-392
- [100] 加藤ほか: 先進車両制御安全システムにおけるセンサ技術と通信技術, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2001) pp.296-297
- [101] 中島, 黒田: ITS—走行支援と予防安全を実現するセンサ技術, 電学誌, Vol.121, No.7 (2001) pp.462-465
- [102] 特集 自動車のセンサ, 自動車技術, Vol.56, No.4 (2002) pp.4-85
- [103] 第5回 AHS 研究報告会資料, 国土交通省国土技術政策総合研究所, AHSRA (2001)
- [104] 西原: ITS における移動体通信, 電気学会誌, Vol.120, No.2 (2000) pp.86-88
- [105] 藤井: 車々間通信技術, 自動車技術, Vol.52, No.2 (1998) pp.71-74
- [106] 加藤ほか: 協調走行と運転支援, 自動車技術, Vol.55, No.11 (2001) pp.42-46
- [107] 徳田: デモ 2000 協調走行の車々間通信, 電子情報通信学会技術研究報告 ITS 研究会, ITS-2000-46 (2001) pp.25-30
- [108] 次世代人間協調・共存型ロボットの応用に関する調査研究成果報告書, 財団法人製造科学技術センター (2002) pp.57-63
- [109] Jody Duncan: The Making of The Lost World: Jurassic Park, Ballantine Books (1997)
- [110] Mark Cotta Vaz and Patricia Rose Duignan: Industrial Light+Magic—Into the Digital Realm, A Del Rey Book (1996)
- [111] Douglas Trumbull: Entertainment Design Workshop, <http://www.edesignnw.com/>

第2章 医疗机器人

2.1 医疗机器人的应用范围

日本正在快速步入老龄社会。为了保持社会的活力,应该支持老年人参与社会活动,而为了弥补护理人员的不足,又要求开发老年人自我照料的支援设备和系统^[1]。

另外,在医学领域中,为了提高患者的生活质量(QOL: Quality Of Life),外科各个领域的所谓微创外科手术技术近年来发展得很快。微创外科手术就是将手术钳、电手术刀等器械穿过很小的切口插入腹腔,从体外操作器械完成手术的全过程。可见,微创手术能够大大减轻手术创伤对患者肉体的伤害,更适合高龄患者的治疗。

在21世纪的产业中,医疗福利领域将占有非常重要的位置。人们对从遗传工程、组织工程、再生医学等新医疗技术衍生出来的先进医疗方法寄予厚望。

这一状况很自然地让人们将机器人技术在医疗福利领域的应用抱有期待。

对医疗机器人技术开发的期待主要集中在以下几个方面。

(1) 实现安全和正确的治疗 近年来,微创手术(例如,在内窥镜下进行手术)在很多医学治疗领域备受青睐,因为它能最大限度地缩小患者的创口,缩短住院时间,促进术后恢复。还必须指出,无论是高龄患者还是一般患者,都需要实施像细小血管的对接、显微外科手术这样一些超越人手技能的医疗操作,所以从增强人的能力来看,医疗手术还需要有精密定位技术。

(2) 确保医疗人员的安全 最近感染程度很高的部门(如化验检查)对机器人技术的呼声甚高。例如,ADIS之类的治疗,不但难度大,而且必须防止血液等活体试样的感染,因为它们致死率很高。再如,最近流行的在X射线支持下边观察边手术的所谓 inter-

ventional radiology(介入放射学)治疗,这种方式虽然有助于提高治疗的正确性和安全性,但医师在手术过程中却容易遭受大剂量的辐射。所以,要求开发一种能够在这种环境下发挥治疗作用的器械,以确保医疗人员的安全。

(3) 自助支援和 QOL 随着日本快速步入少子高龄的社会,为了维持社会的活力,提高生活质量,维持高龄者的健康和身体机能是必不可少的。矛盾的是随着年龄的增加,身体机能的降低又是不可避免的。因此,对开发防止感觉机能、行走能力下降的训练器械,或者补偿衰老肌体功能的器械出现需求。尤其当身体的某一部分机能恶化后(比如,卧床不起、缺乏社会交流能力),会造成老年人身体机能和精神的急剧下降。可以说,基于机器人应用技术来开发自助支援器械的任务已经迫在眉睫。

(4) 实现人性化的医疗环境 护理人员数量的严重不足使近年来医疗人员的负担大大增加。这样一来,要想实现与患者人性地互动,给予对方精神安慰的所谓人性化医疗环境就变得越来越困难了。如果把机器人引入到医疗现场,让机器人代替医护人员完成部分工作,而让护理人员去完成那些必须由人完成的工作,将有利于让有限的人力专注于更加重要的事情。应该指出,引入机器人技术绝不是让人与患者分离,而是构建更为协调的医疗福利环境。

(5) 医学教育的支援 为了改进医疗技术培训,引入具有虚拟现实感的机器人技术可以在教育仿真系统中发挥重要作用。近年来,由于动物保护意识的增强,医疗培训体制被要求最大限度地减少动物实验,在这个方面同样期待机器人技术的应用。

如上所述,将医疗机器人的应用领域分类归纳如表2.1所示。

表 2.1 医疗机器人的种类

应用领域	装置示例
检查、诊断	基于图像诊断确定病灶位置的装置、确定诊断探头位置的装置、生理检查支援系统
治疗	手术支援机器人、显微外科支援机器人、放射线治疗标的定位装置等
医院内部间接作业	检验样本输送装置、食物输送机器人、药品分发机器人
康复支援	步行训练支援、韧性训练支援
自立支援	步行支援、动力装置、饮食支援机器人
护理支援	转移支援装置、环境控制装置(ECS; Environmental Control System)
医学教育培训	心肺移植仿真、内窥镜操作仿真、内窥镜下的手术仿真
生物科学支援	显微受精支援系统、细胞操作

2.2 手术支援机器人

2.2.1 计算机外科和手术支援机器人

1. 计算机外科^[2]

众所周知,机械制造领域一直广泛地流行 CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing,计算机辅助设计/计算机辅助制造)的生产方式,也可以叫做 CAE(Computer Aided Engineering)。其含义是在设计阶段采用有限元法和各种动力学计算机仿真,得到最优设计结果,然后将得到的设计数据输入数控机床(NC 机床)自动加工,再利用自动装配系统实施高效装配,最后利用计算机测量系统完成检验工作。实践证明,这样的制造模式使生产活动达到了很高的效率,并且有助于构筑所有工序的综合信息系统。

如果将上述手段应用到医学领域,那么设计过程就相当于手术前的诊断过程,这时三维医用图像的测量技术将起关键的作用。然后以此建立手术规划,进行手术仿真,最后利用所得的数据完成实际手术的导航任务。

在术前可以利用 X 射线、MRI-CT 等各种三维医用图像测量技术,获得器官的三维构造信息,并据此建立对象的立体形状模型。另外,还可以利用质子射线断层成像法(PET; Positron Emission Tomography)、核磁

共振图像(f-MRI; functional Magnetic Resonance Imaging)、脑磁场测量(MEG; magnetoencephalography)等检测方法把功能信息和解剖学信息综合起来建模,再通过反复的外科手术仿真,建立手术综合规划。显然,这些技术一定会为外科手术开辟新的天地。

人们随之面临的课题就是如何从术前诊断信息和手术规划信息中寻求帮助手术的技术。机械系统的判断功能虽然不比人更高,但在精度和力度等方面的把握能力却比人强得多。因此,利用术前的手术规划信息控制高精度的机械系统,有利于高精度手术的实施,甚至有人正在研讨如何将此应用于远程手术(手术医师与患者不在同一物理空间中)。所谓不在同一物理空间中并非指简单的距离分隔,还包括医师的手臂无法到达部位的作业。手术支援机器人就是这样一种高性能的手术器械,它相当于外科医师的一只“新手”。

计算机外科(computer aided surgery)就是在上述机电一体化技术驱动下的外科手术的支援技术。

2. 手术导航技术

随着 MRI 和 CT 的发展,不但精细三维成像(volumetric imaging)得到普及,而且各种三维测量和图像处理也得以实现,为实施定位脑手术、整形外科手术等在术前利用图像确定目标和接近方向的技术奠定了基础,称之为“图像空间的三维手术规划——手术战略信息的制定”。将这些信息应用于手术导航就是指利用与患者对应的位置图像信息对手术实施引导。

手术导航系统的功能是在计算机的显示器上显示出断层图像或三维 CG,在手术操作过程中把手术部位的图像实时显示在 CG 上。由于手术医师能够自如地掌握操作部位及其周围的三维结构,因此可以提高手术的安全性、效率和有效性。目前有人正在研究一种更高级的手术导航技术,即不仅仅在画面上提供上述信息,而且把医师观察到的实际空间与虚拟空间信息正确地重叠在一起,以构建用于手术空间导航信息提示的超现实感环境。

手术导航位置测量系统除了对再现性和

精度有要求之外,由于它是在手术空间中使用的,所以有杀菌的要求。目前使用的三维位置测量系统如下。

1) 机械式

利用编码器测量多于6自由度的手臂上各个关节的转动角度或直线(或曲线)移动距离,以获得手部位置和姿态的信息。该系统的缺点是有时手臂的操作比较麻烦,在同一时间内只能测量一个对象的位置,为了保证无菌,手臂必须用无菌罩覆盖等。然而,只要机械加工精度足够高,即可保证整个系统的精度,因此在后面所述的手术支援机器人中,它是最适合发展成为被动维持手术器械位置的系统。

2) 光学式

这种导航方式用数台摄像机拍摄指示器上的光学标记(发光二极管等),根据三角测量原理来计算这些标记的位置。此外,反射也可以采用光扩散性很强的非发光二极管物质标记物。该方法的精度可达0.3mm左右,并可以同时测量多个位置。不过,如果摄像机与标记物之间有障碍物,则无法得到位置信息。图2.1为一种光学式三维位置传感器。

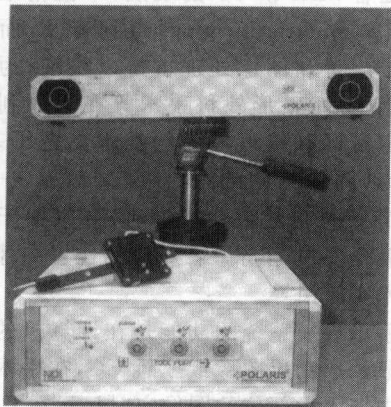


图 2.1 光学式三维位置传感器
(POLARIS Optical Tracking System,
Northern Digital Inc.)

3) 磁性式

磁性式方法利用手术外部的多个线圈产生磁场和电磁波,通过指示器上的传感器检测磁场强度和电场强度,计算指示器到各个线圈的距离,获得三维位置。该方法的优点是即使从外部无法看见指示器也能进行位置

测量,缺点是如果手术现场有磁性体则容易产生干扰误差。

有关三维手术支援的研究,目前主要集中在实际手术空间和图像空间之间如何对应的问题上。一般的方法是用多个坐标系针对同一标记反复进行测量,将数值一一对应。

例如,手术前在患者头部固定数个标记物,它们能起到手术中患者头部位置与手术前图像位置彼此对应的媒介作用,所以标记物固定后应该作为手术前的图像拍摄下来,然后再拍摄用于系统的术前图像。这幅术前图像能够提供导航位置信息,应该是一幅具有极高分辨率的三维图像,同时在图像内应该可以测量到前述标记物的位置。

进行手术时,首先在正前方测量头部标记的位置。这时至少应该测量头部固定的多个标记中的3个,以供三维定点设备或摄像头图像进行导航图像处理使用。实际上,考虑到测量误差,人们通常都测量4个以上的标记位置,使数据处理有冗余。

这样做的目的是让手术开始前测得的标记与术前图像能够一致。于是,依据它们的对应关系就可以实现手术时头部的位姿与术前图像的位置姿态相对应,即实现坐标系的匹配。

若将上述对应关系用函数表示出来,那么在手术中利用三维定点设备指定实际空间中任意一点的位置后,即可由函数计算出该点在图像中的坐标,由此成功实现术前导航。

这种将术前图像空间与实际空间的“配准”称为 registration。

上述的标记法是一种很稳定的 registration 方法。不过为了提高精度,还可以用创伤法,就是在手术前将标记嵌入患者的骨骼中。对照之下,surface registration 方法与此完全不同,属于无标志的 registration。这种方法借助于多个点的数据求解对象部位的表面形状,配准出一个类似的表面。

3. 手术支援机器人的分类

按功能和应用形式来划分,手术支援机器人的分类如图2.2所示。首先,按照应用可以分为导航机器人和治疗机器人,导航机器人的任务是引导医师正确操作手术器械确定病灶的部位,治疗行为最终仍然交给医师

去完成(根据定位的结果)。治疗机器人除具有定位功能外,还能参与具体的治疗作业,如骨骼的切削、激光照射、血管吻合等。

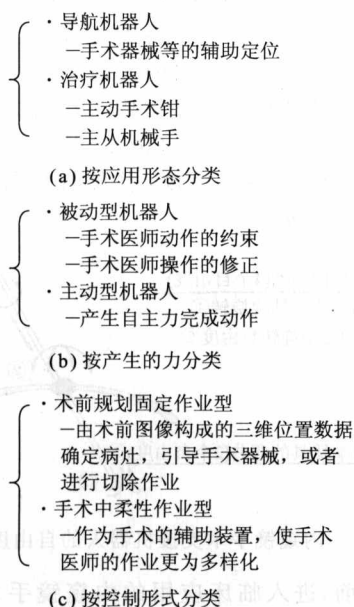


图 2.2 手术支援机器人的分类

根据机器人产生的力的大小,还可以分为被动型和主动型机器人。所谓被动型机器人就是机器人本身并不产生较大的力,例如,在显微手术中,机器人仅向手术医师的手部施加很小的力,目的在于抑制医师在定位和进行显微手术时手部的颤动。所谓主动型机器人就是能够自主地产生外科处置过程中所必需的力。

按机器人的控制形式可以分为术前规划固定作业型和手术中柔性作业型机器人。前者如用于整形外科领域,手术中器官的变形和移动很小,只是利用术前的三维测量结果正确地切去部分骨骼。后者如用于近年来发展很快的由内窥镜引导,在局部空间和视野中根据医师的命令完成柔性动作的机械手,以及替代医师助手负责操作内窥镜的机械手系统等。

2.2.2 手术支援机器人的实例

1. 内窥镜操作手^[3~7]

在内窥镜手术中,主刀医师在内窥镜的视野范围内实施各种外科处置,操作内窥镜的任务通常交给助手完成。此时要求主刀医

师和助手能够顺畅地沟通作业意图。但是这里存在一个问题,是助手在保持内窥镜的时候很难避免手的颤动,由此会造成图像的模糊,以至于无法为医师提供良好的视野。

为了解决主刀医师与助手之间的沟通问题和颤动问题,在腹腔镜手术中出现了内窥镜机械手,这是一个依据医师的操作保持内窥镜(腹腔镜等)位置的机械手系统。该系统用于远程手术、手术培训等。

Wang 等开发了 AESOP(Automated Endoscopic System for Optimal Positioning)机械手。它是一个 SCARA 型的 6 自由度机械手,能以插入孔为中心控制旋转和前、后移动。

Taylor 等开发了 LARS(Laparoscopic Assistant Robot System)机械手,它除了 XYZ 轴这 3 个自由度外,还有绕腹腔插入口旋转的第 4 个自由度。它靠手臂(平行连杆机构)抓取腹腔镜,将平行连杆机构的一个顶点设为插入孔,从机构上能够实现腹腔镜以插入孔为中心的旋转运动。

图 2.3、图 2.4 为小林等开发的腹腔镜手术内窥镜操作机械手系统。该系统考虑了安全、洗净、消毒和操作性等多个因素。机器人

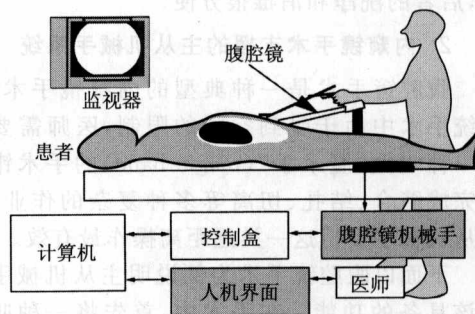


图 2.3 内窥镜机械手的系统组成

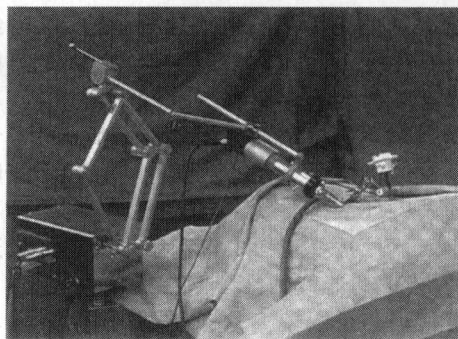


图 2.4 内窥镜机械手的外观(东京大学)

采用5连杆机构,它的组成部分有球形关节部分(用于抓取腹腔壁套针)、驱动部分、操作交互界面等。5连杆机构的作用是从物理上把驱动部分与患者隔开,并增加了内窥镜的自动调焦功能,克服传统内窥镜必须进行前后移动才能缩放病灶图像的缺点。这样,机械手的动作范围被约束在有限的二维平面内,大大降低了医师、患者和机械手之间的干涉,提高了安全性。

至于输入操作命令的交互界面部分,为了避免在手术中被误用,该系统并未采用脚踏开关。界面上有内窥镜移动方向的显示画面,移动方向的输入则靠手术医师头部的移动,或者固定在手术钳把手处的手动开关,只有在医师确认移动方向正确后才能驱动机械手。重复执行一连串的命令-确认-驱动动作的目的在于避免误操作。与其他机器人相比这种方式有以下特点:

① 内窥镜无需进行前后移动,由于机械手的运动范围受到限制,可以避免损伤腹腔和内脏。

② 腹部上方留出的操作区域很大。

③ 驱动部分和5连杆机构部分易于分离,后者的洗净和消毒很方便。

2. 内窥镜手术支援的主从机械手系统

腹腔镜手术是一种典型的内窥镜手术。传统手术中由于受到空间的限制,医师需要靠一种叫做“魔手”(magic hand)的手术钳来完成缝合、结扎、切离等多种复杂的作业。主从机械手支持这一类远距离操作最有效。

下面以腹腔镜手术为例说明主从机械手应该具备的功能。在手术中,首先将一种叫做套针的内径约为10mm的管状手术器械插入腹腔壁,充当各种器械的插入口。由于腹壁组织事先使用了肌肉松弛剂,所以肌肉组织只有弹性,不会自主产生动作。所有器械操作都以插入口附近作为假想中心进行,不会受到来自腹壁的多余反力。因此,相当于手术钳的机器人手臂的运动应该以位于腹腔壁插入口处的套针为中心。通常,腹腔镜下的手术器械被置于插入口和手术处理区域连成的直线上,器械轴被限制在这条直线上,自由度很小。企图偏离这条轴线,向侧方移动扩大手术空间是非常困难的,因此要求有很

高的手术技巧。

为了解决直接处理手术空间前端器具的定位问题,可以增加2个弯曲自由度和1个旋转自由度,即可以从各个方向确定接近手术空间的手术钳、剪刀、镊子的位置,以增加作业自由度。图2.5给出的内窥镜外科手术支援机器人就带有绕手术钳插入口的2个旋转自由度、1个直线移动自由度、1个绕手术钳本身轴线的旋转自由度,以及前端器具的2个弯曲自由度。

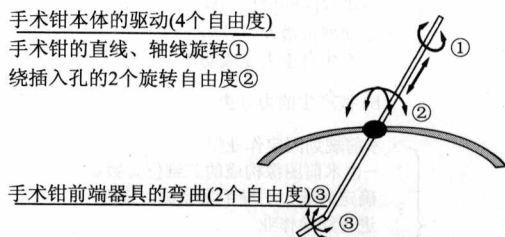


图2.5 内窥镜手术支援机器人的自由度构成

目前,进入临床应用的内窥镜手术支援机器人系统有 Intuitive Surgical 公司的达·芬奇和 Computer Motion 公司的 ZEUS^[7,8]。为了实现细微的作业,人们在缩小医师主臂的动作,以及保证动作如实传递到从臂这两个方面开展了研究。但是这两个系统均无力觉反馈功能,这正是临床医师所需要的。具有力觉反馈的、能实现准确细微动作的高性能手术器械,即外科手术支援机器人适用于血管、神经搭桥这一类手术。因此,除了腹腔镜手术外,在心脏冠状动脉搭桥手术、瓣膜置换手术、前列腺切除手术等多种临床应用中都在讨论和推广这样的成果^[9,11]。

一段时间以来,手术机器人研究的重点都放在再现医师的手法技巧上。实际上,目前医师手术的手法和技巧已经形成了体系,但是机器人未必一定要原封不动地实现它们。例如,血管的处理问题,传统上必须用细绳结扎以抑制血管出血,但是由于新近出现了超声波手术刀,在微创伤外科手术中用它把血管封闭起来进行凝固止血大大简化了血管处理。今后随着引入具有夹持、切割、结扎等基本功能的电手术刀、超声波手术刀、激光手术刀等先进器械,手术支援系统的安全性会大大提高。

3. 整形外科手术支援系统^[11,12]

在整形外科中,术前诊断可以获得对象部位的三维位置和形状测量结构,再借助于上面讲到的术前规划固定作业型手术支援机器人系统,就可以在手术中将它稳定地再现出来。举一个典型的例子,如在日本人工股关节置换手术中,最早由大阪大学研发的系统按照这样的术前规划正确地实施了切削骨骼的手术,其结果是人工关节植入骨骼的精度比传统手术更高。

现在整形外科手术微创化的呼声越来越高,骨骼切削器械出现了小型化、微创化的趋势。这方面所期待的是能够在X射线图像引导下自动恢复到正确的初始位置(骨折整形)的机器人技术。

4. 穿刺支援机器人

众所周知,不仅在外科处置中,也在内科处置中广泛使用穿刺。例如,整形外科的神经根传导阻滞法、椎体成形手术、脑神经外科的淤血抽吸、肝脏外科的无线电波烧灼手术等,都用到穿刺手术。穿刺处置通常是在X射线透视或超声波图像的引导下进行的,最近出现了在MRI摄影引导下实施的趋势。有人正在开展机器人进行目标组织穿刺的探索^[14,15]。

图2.6列举了一台置于CT机内的脑神经外科手术穿刺机器人的例子。图2.6中的假想目标是一个置于头部模型内的直径为1mm的钢球,显示出进行穿刺动作时的X射线图像。

这种机械手必须设置在图像设备的内部,因此既要求它小型化,又不得影响图像质量。如果机器人在MRI装置中工作,它既不应该对MRI内的磁场造成影响,又不应该受到MRI高强度磁场的影响,因此它的结构材料都应该是非磁材料。显然电磁式电机不适合做它的驱动器,应该改成超声波电机或水压驱动马达等^[16,17]。

5. 显微手术机器人

在脑神经外科中也有微创脑神经外科手术,其特点是既要求定位正确,又要求动作柔性。目前,脑神经外科显微手术机器人正以临床应用为目标开展研发。

在这类系统中,从动手臂需要抑制医师

在微细手术中手部的颤动,完成正确的作业支援任务。这类系统正在开发中^[18,19]。图2.7给出的是以脑神经外科手术为对象的系统实例。

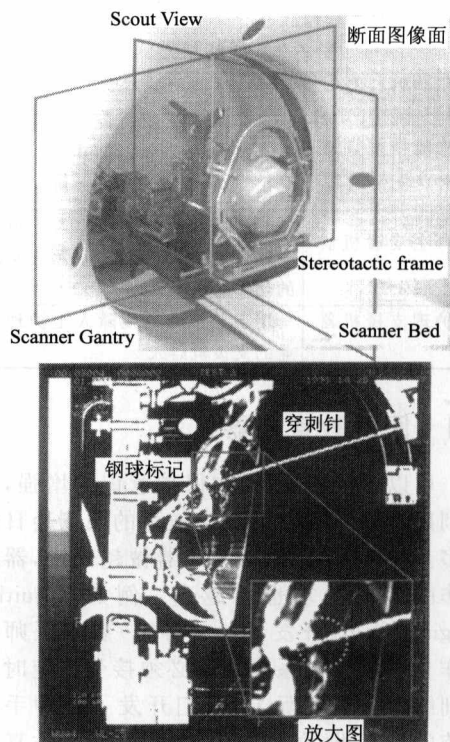


图2.6 置于X射线CT内的脑穿刺机械手和模拟实验的X射线图像(东京大学)

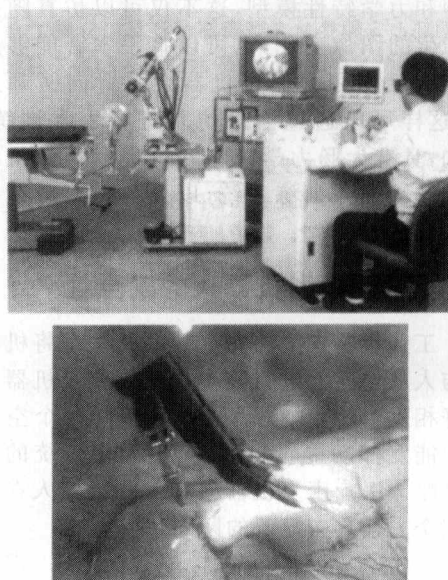


图2.7 脑神经外科手术支援显微手术机器人

2.3 福利机器人

福利机器人的应用领域有机能恢复训练、自主支援、护理支援等。详细情况将在本篇第3章中加以说明(表2.2)。

表 2.2 福利机器人

应用领域	说 明
机能恢复训练支援机器人	能按照使用者的情况改变训练条件的、高效的机能恢复训练机器人
自主支援机器人	起到辅助或替代残障人士由于身体机能缺失或减弱而无法实现的动作的机器人
护理支援机器人	用于老年人或残障人士护理作业的支援机器人

2.4 医学教育机器人

可以想象,随着动物保护意识的增强,今后利用动物实验辅助医学教育的限制会日渐增多。与其矛盾的是,医疗器械越先进,器械操作的训练要求也就越高。例如,Intuitive Surgical 公司(开发了达·芬奇)要求医师在操作支援机器人系统之前必须接受一定时间的训练学习。实际上,人们开发了各种手术训练的仿真器,如心肺移植手术训练仿真器等。

这些系统在计算机内建立了脏器的三维模型和力学特性模型,这不仅可以仿真随操作产生的图像变化,也可以将手术者能够感觉到的反作用力通过机器人手臂向医师反馈,这样可以通过治疗仿真进行手术训练。例如,具有大肠力学模型和可提示力觉机构的大肠镜插入训练系统,以及各种内窥镜手术仿真器械等^[20]。

2.5 医疗福利机器人的安全性

工业机器人解决安全性的办法是将机器人与从空间上进行隔离。医疗康复机器人正好相反,只有人和机器人处于同一个空间内才能发挥功能,因此完全不同于传统的安全策略。医疗康复机器人和工业机器人在以下四个方面具有显著的区别:

① 直接与人(患者、护理人员、被护理人员等)接触。

② 作业内容变化无常。

③ 不能发生误动作错误。

④ 机器人的使用者都是非专业人员。

因此,将工业机器人简单地扩展到医疗康复领域将是极其危险的。

增大机器人的工作空间,或者自由度,实际上容易引发软件错误和控制系统的故障,导致异常动作,机器人发生干涉和冲突的危险性也就随之升高。因此,有人提出从机构上来限制机器人的工作空间,以保证安全的建议^[21,22]。

不过,这样做的后果可能会限制了机器人固有长处的发挥,造成设计的失误,或者使机器人动作的柔软性和多样性的特点丧失殆尽。这些彼此矛盾的要求凸显出机构分析的重要意义。

手术支援机器人接触的患者通常处于麻醉的状态,一般来说,医师在一定程度上对患者的反应是清楚的,相比之下康复机器人所面对的对象反而很复杂。非常重要的一点是手术支援机器人的动作应该很容易被使用者预测。如果能够预测,那么使用者一方就便于采取保证安全的措施,也便于防止因人为差错而引起的故障。总之,对于安全来说,极其重要的一点是应该根据现场的实际使用条件进行保证安全的设计。

手术支援机器人与患者接触的部分应该与一般的手术器械一样事先进行灭菌、洗净、消毒。每一次手术结束后,除了将手术中与患者接触部分沾染的血液等体液洗净外,还应该进行充分的消毒和清洁,以杜绝细菌、病原体等的感染。

佐久间一郎

参考文献

第2章 医疗机器人

- [1] 土肥:医療におけるロボティックスの現状と将来, 日本ロボット学会誌, Vol.18 (2000) pp.29-32
- [2] T. Dohi et al.: Advanced Hand and Vision for Surgeon, Proc. 12th International Symposium and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (1998) pp.646-682
- [3] R. Taylor: A Telerobotic Assistant for Laparoscopic Surgery, IEEE Engineering in Medicine and Biology (My/June 1995) pp.279-288
- [4] E. Kobayashi: A new safe laparoscopic manipulator system with a five-bar linkage mechanism and an optical zoom, J. Computer Aided Surgery,

- Vol.4 (1999) pp.182-192
- [5] Y. Wang : Robotically Assisted Laparoscopic Surgery : From Concept to Development, Computer Integrated Surgery (1995) pp.577-580
 - [6] <http://www.computermotion.com/aesop.html>
 - [7] <http://www.intuitivesurgical.com/home.html>
 - [8] <http://www.computermotion.com/zeus.html>
 - [9] B. J. Jones et al. : Robot-Assisted laparoscopy in urology. Radical prostatectomy and reconstructive retroperitoneal interventions, Urologe [A], Vol.41 (2002) pp.144-149
 - [10] H. Reichenspurner et al. : Use of the voice-controlled and computer assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting, J. Thoracic Cardiovasc. Surg., Vol.118 (1999) pp.11-16
 - [11] V. Falk et al. : Endoscopic computer-enhanced beating heart coronary artery bypass grafting, Ann. Thorac. Surg., Vol.70 (2000) pp.2029-2033
 - [12] An Image-Directed Robotic System for Precise Orthopaedic Surgery, Computer Integrated Surgery, MIT Press (1995) pp.379-396
 - [13] <http://www.robodoc.com/eng/robodoc.html>
 - [14] K. Masamune et al. : System for robotically assisted percutaneous procedures with computed tomography guidance, Comput Aided Surg., Vol.6 (2001) pp.370-383
 - [15] K. Cleary et al. : Robotically assisted nerve and facet blocks: cadaveric study, Acad. Radiol., Vol.9 (2001) pp.821-825
 - [16] K. Masamune et al. : Development of an MRI-compatible needle insertion manipulator for stereotactic neurosurgery, J Image Guid Surg., Vol.1, No.4 (1995) pp.242-248
 - [17] K. Chinzei et al. : MR Compatible Surgical Assist Robot : System Integration and Preliminary Feasibility Study, Proc. MICCAI 2000, Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (2000) pp.921-930
 - [18] K. Kan et al. : Microscopic Manipulator System for Minimally Invasive Neurosurgery, Proc. of the 12th International Symposium and Exhibition, Computer Assisted Radiology and Surgery (1998) pp.594-598
 - [19] R. Taylor et al. : Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation, Proc. MICCAI '99, Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (1999) pp.1031-1041
 - [20] K. Ikuta et al. : Portable Virtual Endoscope System with Force and Visual Display for Insertion Training, Proc. MICCAI 2000, Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (2000) pp.907-920
 - [21] 正宗ほか : 手術支援マニピュレータにおける安全性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '98 論文集 (Vol. B) (1A III 1-3)
 - [22] 生田, 野方, 石井 : 福祉ロボットの制御に関する危険性評価法の提案, 日本ロボット学会誌, Vol.15 (2001) pp.81-90

第3章 福利机器人

福利机器人在福利机械方面占有重要的地位,其开发研究与日本的福利制度以及与康复医疗学科相关的知识分不开。本章首先叙述基础知识,然后对福利机器人进行说明。

3.1 福利事业的基础

3.1.1 术语^[1,2]

与福利机器人相关的福利事业术语如下:

- 福利工程学(rehabilitation engineering)

在人类社会活动和日常生活中有一部分人属于所谓的残障者,他们由于身体残障引起机能下降或丧失。支援残障者的工程学就称为福利工程学。对该领域的研究(例如,假肢)已经有很长的历史了。如果研究的对象专注于老年人,那么这样的福利工程学就被特别地称为老龄工程学(gerontechnology,它是 gerontology(老年学)和 technology 的复合词)。

- QOL(Quality Of Life)

QOL 即生活质量。医疗、康复的目的就是提高对象人群的 QOL。

- 老年人(aged person)

65 岁以上的人称为老年人。若将老年人按两个阶段进行划分,未满 75 岁的称为前期老年人,那么 75 岁以上的称为后期老年人;若将老年人按三个阶段进行划分,则 75 岁以上 85 岁以下的称为中期老年人,85 岁以上的被称为后期老年人。

- 残障者(handicapped person)

残障者是指在日常生活或社会生活中长期受到某些限制的人(摘自《残障者基本法》),又可以分为身体残障、智力残障和精神残障(以下统称为“残障”)三类。残障的认定因国家的不同而异,有的在日本未被认定为残障,而在有的国家则可能将其认定为残障,因此简单地比较统计数字是没有意义的。

- 国际残障者分类(ICIDH)

WHO 在 1980 年提出了残障模型,它由以下三种形态构成:

- ① 机能残障(包含形态异常)(impairment)。它是残障的第一个层面,表现为身体器官功能或外观的异常(器官层面的残障)。

- ② 能力低下(disability)。它是残障的第二个层面,根据残障机能的不同,表现为患者自身能力和活动能力低下的状态(个人层面的残障),呈现出下面所介绍的 ADL 的情况。

- ③ 社会障碍(handicap)。它是残障的第三个层面,是机能残障或能力残障患者生活的结果给健全人群的社会造成不公平(社会层面的残障)。

- 人体结构学(body mechanics)

人体结构学,即身体的骨骼、肌肉、内脏等各个系统之间的力学关系,也称为生体力学。本书末尾附录给出了上下肢骨骼和肌肉的构造图解。

- 关节可动范围(ROM: Range Of Motion)

这是由各个关节的结构和形状所决定的特有运动的方向和范围。它是神经系统、骨关节残障患者的基本评价项目之一,分为主动运动和被动运动。本书在末尾的附录中给出了日本康复医学会和日本整形外科医学会合编的《关节可动范围表示及测量方法(1995)》的摘录。

- ADL(Activities of Daily Living)

即人们从事日常生活的基本动作的组合。ADL 测试的评价项目有进食、排泄、起居、移动(步行)、更衣、整容、入浴、手指动作等^[3]。

- 常态(normalization)

是指由 N. E. Bank-Mikkelsen 所提出的民生社会的常态概念。他认为正常的民生社会理所应当承受老年人或残障者等一类社会弱势群体的负担。

- 无障碍设计(barrier-free design)

即消除限制残障者活动的建筑环节。它起始于1968年美国制定的“Architectural Barriers Act”,20世纪70年代日本也开始从设计方面考虑消除残障者的活动障碍问题。不过这一概念真正在日本普及的时间约在20世纪90年代。1994年,日本实行“促进老年人、身体残障者等顺畅通行的特定建筑物法律(温馨建筑物法)”,2000年实行了“促进老年人、身体残障者等顺畅搭乘的公共交通设施法律(交通无障碍法)”。开发福利设备的时候需要弄清楚相关的环境条件,请参阅本书末尾附录5“机器人安装空间”部分。

- 通用化设计(universal design)

不应该特别针对残障人开展设计,而应为所有人群提供方便。

- 福利设备、福利用具(assistive devices, ~technology)

开发福利设备和福利用具的目标分为4类:①方便老年人、身心残障者的日常生活;②治疗和训练;③代替丧失的机能;④恢复能力。对于福利设备未曾有过明确的定义,不过对于福利用具,可以遵循“福利用具研发和普及促进法(俗称《福利用具法》)”。与之有关的机构是财团法人 Techno-aid 协会。

不过,由于福利设备(用具)对应的英文“technical aids”一词与“AIDS”一词的“HIV 阳性”有相同的后缀,所以近年来很少使用。福利机器人对应于“International Conference on Rehabilitation Robotics(ICORR)”领域,因此可以翻译成康复机器人(rehabilitation robot),也可以使用福利机器人(assistive robot)一词。

- 辅助装具

辅助装具是指弥补残障者身体某一部分的缺失或功能障碍,有利于他们日常生活和社会生活的器具。在《身体残障者福利法》中共规定了16种辅助装具,有假肢、装具、座位抓握装置、盲人安全杖、假眼、眼镜、点字器、助听器、人工咽喉、轮椅、电动轮椅、步行器、头部保护帽、集尿器、造瘘用装具、步行辅助手杖。

- 装具(orthosis)

装具是指用于治疗四肢活躯体疾病,减轻机能障碍的器械。根据身体部位的不同可

以分为下肢装具、靴型装具、躯体装具、上肢装具等。

- 自助器具(self-help device)

它是弥补由机能障碍造成的ADL方面能力低下所借助的器具的总称。根据障碍的不同可以分为帮助自主进食、梳理、着装等日常生活动作的食具或器具等。

- 环境控制装置(ECU: Environmental Control Unit)

环境控制装置是指帮助严重身体残障者利用呼吸、眨眼等细微动作自主完成家电操作等日常生活动作的装置。具体的操作方法因残障者的残留能力的不同而不同。

- 康复(rehabilitation)

康复是指从维护疾病患者或精神残障者的人权理念出发,用于恢复其能力,促进其自立训练和治疗的专门技术。有关康复的定义很多,联合国对其的定义也包括在内。

- 自立(independence)

在社会福利的理念中,自立支援中的“自立”是指无论残障程度如何,通过医疗保险、福利服务的形式谋求在社区中自我主体的实现。

- 护 理

护理是指针对因身体或精神残障,无法自理日常生活的人开展的援助活动。它的意义很广泛,既包含广义的照顾(倾注爱心、支援),也包含狭义的帮助(进食、入浴、排泄等日常生活行为的帮助和关照)。目前社会上尚无通用的定义。

- 护 助

护助是指对不健全的部分施以帮助,不过它限于援助日常生活的具体行为。有些残障者对于那些无视个人意志的“强迫性关照”持有反感,所以他们理解的护助有时是指“对自身不健全的部分施以帮助”之意。

- 辅助犬

辅助犬是一个总称,是指在身体残障者辅助犬法律(2002年)中所规定的导盲犬(为视觉残障者服务)、导听犬(为听觉残障者服务)、护助犬(为肢体不健全者服务)。引入辅助犬的目的在于保护成年人在某一方面判断能力的不足,引入时应该注意使用的方法。

- 废弃综合症(disuse syndrome)

废弃综合症是指由心身过度荒废导致的

各种功能低下的症状。包括因关节变形或收缩固化引起的挛缩,长期卧床后在体重作用下骨节突出部分压迫下部皮肤或软组织,由循环障碍导致的褥疮等。

3.1.2 康复医学^[2,4,5]

1. 何谓康复医学

康复医学是综合了物理医学(physical medicine)和康复这两个学科的专门医学学科,其目的是利用物理医学手段诊断和评价由各种疾患引起的神经、肌肉、骨骼系统在运动、认知功能方面存在的障碍,通过治疗和训练等手段帮助患者在身体上、精神上获得恢复。

该领域注重对患者残留机能的再生和提高,因此也称其为“增效医学”。1963年,日本成立康复医学会,1996年康复科升级为标准诊疗科。

2. 残障的理解

实施康复医学,需要组建一支以专业康复医师为核心的由多种相关职业医师组成的团队,它包括康复护理师、理疗师(PT)、作业治疗师(OT)、语言听觉治疗师(ST)、假肢装具师(PO)、社会工作人员等。团队协作工作的基础是医师成员相互理解彼此的业务内容。为此制定了一种通用工作语言,即卡片记录法(POMR: Program-Oriented Medical Record)。该方法能够迅速地抓住患者的疾病或残障的症状,有效地为患者提供最好的康复医疗服务。

POMR由信息收集、问题列表、初期计划立项、过程记录4个步骤组成。问题列表由信息收集开始,按照表3.1所示的问题列表的权重顺序一一加以记录,甚至包括问题症状发生和解决的时间。

初期计划主要包括解决残障问题的精密检查内容、药物疗法、康复程序、治疗目标等,应该利用过程记录对初期计划作综合的评价,并根据实际情况对治疗计划加以修正后再进行立案。

在康复程序的立项和治疗效果评定中有时需要借助于ADL。有各种评价的方法,表3.2给出机能自立度评价法(FIM)所采用的评价尺度、评价项目和评价内容。列入评价

表3.1 康复医学的主要问题列表

机能残障	疼痛(部位)、挛缩(部位)、肌肉力量低下(部位)、单侧麻痹(右、左)、骨折(部位)、对称麻痹、四肢麻痹、细微障碍、麻痹(部位)、痉挛或抽筋(部位)、全身衰弱、肌肉萎缩(部位)、失声、发声障碍、运动受限(部位)、变形(部位)、浮肿(部位)、截肢(部位)、吞咽障碍(部位)、褥疮、呼吸障碍、视觉障碍、听觉障碍、意识障碍、痉挛发作、发育延后、肥胖、膀胱障碍、直肠障碍、性功能障碍、记忆障碍、失认失行、情绪障碍、视空间认知障碍、起立性低血压、内科问题、外科问题、其他
能力低下	步行障碍、ADL障碍(具体项目)、运动负重、自发性低下、行动异常、假肢、装具、自助器具、残障接受程度(适应性)、其他
造成的社会负担	家庭关系、经济问题、居住(改造等)、职业、上下班或上学、人事关系、教育、出院准备、出院后的护理、其他

项目中的移动主要是指步行,而且重点要求在同一平面内实现移动动作。至于移转,则主要是指在床与轮椅之间的转移动作,而且包括在移转前后被护理者的朝向发生变化的情况。

表3.2 机能自立度评价法(FIM)的评价尺度和项目

自立	7:完全自立(含时间、安全性) 6:部分自立(使用辅助装具等)	无护助者
部分护助	5:监视或准备 4:最小护助(患者自身占75%以上) 3:中等护助(50%以上)	有护助者
完全护助	2:最大护助(25%以上) 1:全护助(不足25%)	

评价项目

自我护理	进食、整容、入浴、更衣(上半身)、更衣(下半身)、如厕动作
排泄管理	排尿、排便
转移	床、椅、轮椅、厕所、浴室、沙发
移动	步行、轮椅、楼梯
交流	理解
社会认知	社会交流、问题解决、记忆

残障治疗的方法包括运动疗法、物理疗法、日常生活活动训练、机能作业疗法、语言疗法等,使用和借助的训练器械包括假肢、装具、轮椅、手杖、步行器、座位固定装置、自助

辅助装具、福利设备和福利用具等。

福利用具的选择和引入首先应该考虑与本人需求和心身机能的匹配程度,同时还要顾及年龄因素和病情状况。此外,还要考虑安全性、舒适性、耐久性、操作性、经济性、机能持久性、妥当性、尺寸、设计外观以及携带和收藏保管的便利性等多个方面。

如果双手、双足、身体在一定程度上患有运动机能残障,其致病的原因包括中风、脑外伤(TBI)、脊椎损伤(SCI)、脑麻痹(CP)、肌肉营养不良(PMD)、肌萎缩性侧索硬化症(ALS)、截肢、关节风湿、骨折等多种情况。

值得注意的是,在康复治疗中残障的程度和内容往往是因人而异的,残障的状态也不尽相同。特别是后天残障者,残障对他们精神上的打击很大,会引起巨大的失落感。因此,在残障康复过程中帮助患者克服心理上的障碍,增强战胜残障的意志是至关重要的。也就是说,康复治疗应该因人而异。

3.2 福利设备、机器人

3.2.1 分类

一种分类方法是将第2章的表2.1 医疗机器人的种类中所列举的康复(狭义上指恢复机能的训练)支援、自立支援、护理支援和(院内)间接作业支援设备等归入福利机器人。另一种分类方法是按照使用者、使用环境进行分类。

(1) 康复支援机器人 康复支援机器人是在康复医疗中用于恢复机能训练的机器人。

(2) 自立支援机器人 自立支援的目的在于丰富残障者的个人生活,支援他们按照自己的意愿进行操作和自立。主要是指ADL支援,如进食、排泄、起居、移动、更衣、整容、入浴之类。有时引入自立支援机器人的目的在于减轻护理人员的劳动强度,因而又兼有护理机器人的功能。

在自立支援机器人中,社会活动支援机器人占有重要的地位,它的作用是支援劳动就业或业余活动。

(3) 护理支援机器人 护理的内容基本与上述自立机器人的功能相同,也是围绕ADL展开,主要有进食、排泄、起居、移动、更衣、整容、入浴等。

目前“护理机器人”一词很流行。从目前的技术水平来看,机器人主要起到协助护理的作用,要求达到自动护理还不现实。由于对语义的误解,有些患者可能会拒绝机器人护理,理由是“我根本不想让机器人护理”,或者抱有自负的心理,认为“护理是人干的事情”,不接受机器人的护理。因此,护理机器人有时被改称为“护理支援机器人”,其目的在于强调“机器人仅仅是为了减轻护理者从事护理作业时在肉体和精神上的负担”。实际上,辅助机器人也存在相同的问题,不过本章并未在名词上加以特别的区别。

(4) 间接作业支援机器人 间接作业支援机器人是指以利用护理设施支援非直接护理作业(运输、洗漱、打扫等)为目的的机器人。

3.2.2 举例

1. 康复支援机器人

上面已经提及,残障治疗方法包括运动疗法。康复支援机器人就主要应用于运动疗法,例如,改善和预防四肢运动性能低下、挛缩,让关节在活动范围内进行运动,增强肌肉力量的运动,增强耐力的运动,协调性训练、步行训练、体操治疗等。

如果机器人搭载具有测量康复功能的仪器,就可以定量采集训练对象机能恢复过程中的数据,对恢复过程作定量的分析和评价,记录康复的整个过程。如果被训练者了解自己在训练中的康复数据,也许能够产生某种积极的反馈效果。

1) 关节活动范围(ROM)运动

进行关节活动范围运动的目的是改善和预防四肢运动性能低下或挛缩。

手指或膝部经过整形外科手术后,需要结合被动运动来恢复关节的功能。通常的方法是借助于CPM(Continuous Passive Motion,持续被动运动)装置,通过反复进行某一个模式的运动训练起到预防挛缩的作用。

安川电机开发了一套改进的膝关节活动范围运动系统。该装置可以借助于多自由度结构调整多种运动模式,把训练师训练的运动模式记忆下来。该装置有阻抗控制功能,能够再现出像训练师徒手训练一样的感觉。该装置在庆应大学月濑康复中心临床试验的

基础上,后来被进一步改进成可以同时控制膝关节和股关节运动的装置,并开发出运动疗法装置 TEM (Therapeutic Exercise Machine)^[6],适用于中风、脊椎损伤、脑性麻痹等下肢麻痹患者。

2) 步行训练

骨折或关节手术后,或中风后,患者在步行训练前首先需要在病床上进行肌肉力量强化训练,然后分阶段依次进行起坐、轮椅移动训练、斜面起立训练,然后进入利用平行杆、步行器、手杖的步行训练。显然病情不同,步行训练的内容也不应该千篇一律。一般来说,骨折后或关节手术后应该以负荷训练为主,中风后则应该视患者肌肉力量的情况选择适当的步行训练。步行训练可以在悬吊平衡重锤的跑台上进行,但应该根据被训练者残留机能的大小选择适当的训练强度。

步行训练机器人(AID-1,山梨医科大学)可以通过各种传感器检测患者体重负载的变化,并利用压缩空气实现高精度的体重负载控制,在减轻患者体重的同时保持正确的躯干姿态,甚至可以用残存的微小肌肉力量实现无体重负载的步行^[7]。

图 3.1 给出一种步行支援设备。它的步行面由两组独立驱动控制的皮带组成,利用速度设定可以让皮带以给定的恒速步行模式进行运动,它还具有主动阻抗控制功能,因此可以按照被训练者的蹬踏力来调节皮带的阻力,实现负载步行模式。这样,即使是患有单侧麻痹症状的患者也能得到适当的训练。在护助装置中也有这样的内置式电动卸载机构,另外还有其他多种模式可供选择,如保持护助部分高度不变的所谓固定模式,对解除部分的高度实施柔顺控制的所谓弹性模式,

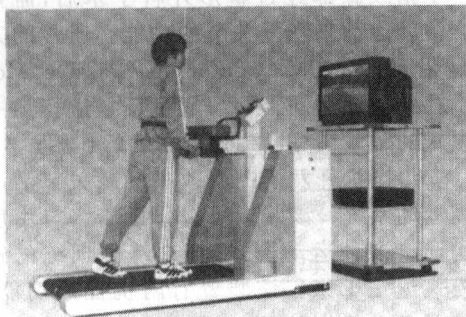


图 3.1 步行训练机 PW-10(日立制作所)

以恒力向上提起被训练者、减轻体重负载的所谓卸载模式等。有时设备还带有图形显示装置,它能与皮带速度同步显示风景,以保持被训练者的训练欲望。

如果患者已经具有依靠自己的腿部力量支撑全身的能力,即可转入室内步行训练。为此可以利用图 3.2 所示的电动助力步行支援机。在它用来支撑被训练者的支撑架的内部装有力传感器,可以测量被训练者步行时施加在支撑架上的力的大小和方向,如果想转向,可以通过控制车轮驱动电机来实现。现在市场上还有各种各样的下肢机能恢复支援系统^[8~10]。

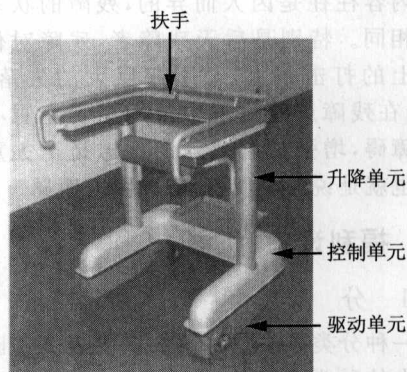


图 3.2 步行支援机(日立制作所)

3) 其 他

例如,目前在改善中风患者麻痹四肢的运动机能时,医师正在尝试选择机器人进行反复主动运动。

如 InMotion 2 (Interactive Motion Technologies Inc.) 是一个安装在桌面上的机械臂系统,它能让患者的手臂反复动作,就像用医疗法训练患者的手臂一样。据报道,它在恢复由中风引起麻痹的上肢的肩、肘、手部机能的训练方面取得了很好的效果^[11]。

在康复领域还有骑马训练机器人系统的实例,据说效果也很显著。人们正在讨论如何评价这些机器人在机能恢复训练医疗效果方面的问题^[12]。

动力装具也能作为康复过程中的一种训练器械。脑血管残障的康复训练系统、在整形外科手术的恢复期同时实现自立和机能训练的系统也正在开发过程中^[13]。

4) 假 肢

在假肢中,对应于上肢截肢称为假臂,对

应于下肢截肢称为假腿。它们由承接腔(球窝)、支撑部分、接头(起关节作用)、手部(或足部)组成。身体残障者福利法中将假肢分为装饰性假肢、作业用假肢、能动假肢等。能动假肢是以提高 ADL 为目的的。以假臂为例,它有两类:一类称为体内力源假肢(通过控制电缆,用肩胛肌的运动控制手部器具);另一类称体外力源假手(通过残留肌肉的肌电信号控制手部器具的开闭)。假肢还可以根据截肢部位进行分类^[2]。

假臂可以近似地看成是与人接触的福利机器人的手部。假臂的手部用来抓取轻重不同的重物,因此有人在从事智能假臂手部的研究,希望能够根据不同的对象输出不同的力。假手在外观和触觉上都应该接近于人手,不过如果是动力假臂,那么其重点还是放在解决机构和质量的问题上^[14]。

按照截肢部位不同,假腿分为股假腿、大腿假腿、膝假腿、小腿假腿、赛姆(saimu)假腿、假脚等。在研究大腿假腿的膝关节接头方面,已经出现一种智能假腿膝关节接头,它能配合步行速度控制小腿的摆动。人们还在开展膝关节转矩控制的研究,希望能够适应上下台阶或楼梯^[15]。

在假肢方面依然面临不少问题,例如,开发体积小、质量轻同时又有足够输出功率和寿命的驱动器以及能源的问题,更方便的人机界面问题等。

2. 自立支援机器人

很多人都会认为处理排泄、辅助入浴、帮助更衣等都是个人的事情,“只要能自理就不想让他介入”。所以,有时会因为过于介意护理人员的存在而不愿意接受护理的服务。也许让残障者自己操作器械可以减轻这种不满情绪,甚至能提高自立的程度。

机器人技术在帮助自立方面主要采取两种形式:一种是以补偿力量的形式发挥残留机能;另一种是通过独立的机器人系统提供机能。

1) 进食、整容、辅助作业

进食的特点是按照个人习惯的速度,依次向嘴里递送食物,设备应该在每天规定的时段内完成进食服务,要做到这一点存在诸多困难。进食支援机器人被认为可以用来减

轻残障者对进食的厌倦情绪,有效地完成护理支援任务。目前人们在这方面开展了不少的研究。

图 3.3 所示的 HANDY1(Rehab Robotics Limited)机器人的原理是由护理者接通电源,将食物放入专用容器内,如果接触传感器检测到使用者的手指或手臂的动作,即可以控制机械手从托盘中选择指定的食物送至口中。可见,这样不仅能缓解使用者的不满,还能减轻护理者的负担。该机器人更换执行部分(托盘)后还可以提供洗脸、刷牙等洗漱动作方面的帮助^[16]。

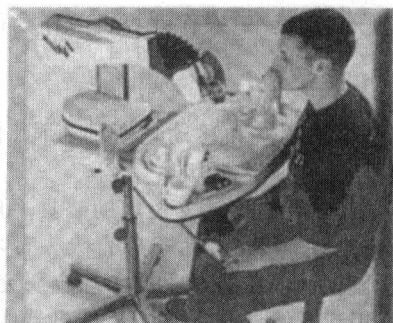


图 3.3 HANDY1(Rehab Robotics Limited)机器人

MANUS(Exact Dynamics)机器人有一个 6+2DOF 的机械手,可以搭载在轮椅上,通过操作 4×4 个按钮和游戏操纵杆来完成进食、整容动作(洗脸、剃须等)、日常生活动作(整理衣服、扶正眼镜、搔痒、排泄等)。动作熟练以后甚至可以完成开门、龙头开关等复杂动作。据报道,截至 2001 年秋它已经拥有 120 名用户。

不过它仍然存在一些问题,例如,多用途器械的操作比较困难,负载重量小,动作迟缓等^[17]。

名为“我的汤勺”的进食护理机器人(名字叫 SECOMU)是一台携带汤勺和食叉的小型机械臂,操纵开关即可辅助患者进食。目前,该机器人一边在市场上进行销售,一边在进行现场实验。图 3.4 为该机器人的本体和操纵装置^[18]。

还有一种基于力控制的进食支援机器人^[19],它能像正常人那样用筷子夹持柔软食物或易碎食物进行用餐。

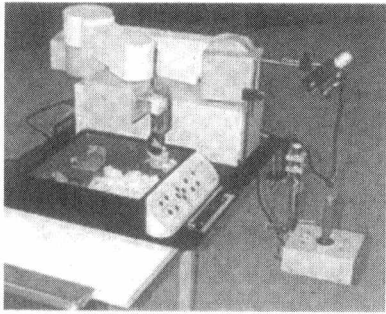


图 3.4 进食护理机器人
“我的汤勺”(名字叫 SECOMU)

此外还有一些自立支援机器人将书桌上的轻作业、辅助读书、操作计算机等作为研究对象。

2) 移动

随着障碍类型和移动场所的不同,自立支援机器人也呈现出差别。

视觉残障者的移动支援辅助装具一般采用盲人安全杖,少数借助于导盲犬。日本机械技术研究所(现在的产业技术综合研究所)自1980年起开始试制 MEL DOG 机器人,它是在导盲犬的基础上重点开发“服从机能”和“聪明的不服从机能”。前者将主人引导到目的地,后者则起到检测障碍物和危险状况的作用。人们还在为视觉残障者开发基于 GPS 和便携终端的基础设施^[20]。

为了方便在运动方面有残障的人士移动,可以在室内、室外设置电梯等装置,或者可以借助轮椅。在室内,正在研发能够沿着安装在顶棚的导轨移动的机器人系统,患者可以靠它支撑部分体重负担实现室内步行。在第3篇4.1节中对室外移动的残障设备已经作了介绍,如有面向老年人的踏板型电动轮椅、身体残障者专用轮椅等。选择操作器界面中列举的功能,电动轮椅甚至可以为重度残障者提供自由移动的便利。

应该指出,移动自立支援与移动环境的综合整治有关,包括去除建筑物的障碍等。

3. 护理支援机器人

目前,用于电动床、电动轮椅移转的升降机等多种福利设备和福利器械都已经实现了商品化,它们所具备的功能是减轻护理人员在护理老年人、身体残障者方面的负担。

被护理者的状态往往是多种多样的,尤其是老年人,他们的身体障碍和精神障碍经常交织在一起,很难加以区分。因此,制定适合所有被护理者的机器人的规格非常困难,一般来说应该从有关老年人的护理保险法细则出发认定和区分护理内容,确定护理机器人的应用范围。

1) 移动

无法自理的残障者的移动,包括体位变换(改变身体位置)和换乘(改变距离)。体位变换,如为了防止褥疮,擦洗无法入浴者的身体,换尿布(抬起患者的臀部)等。每天反复的次数随支援内容的不同而异。换乘包括移转,其中一部分已经开始借助于升降机作业了,但大部分仍然依靠护理者直接作业,属于重体力劳动。

为了减轻劳动强度,日本自20世纪80年代起就着手开展病床移转、轮椅换乘、如厕或入浴辅助时所需要的抱起机器人的研究。例如,电动双臂机器人“NURSY”(东海大学)能借助于主从操作机器人的双臂将被护理者直接抱起来进行移动,“MELCONG”机器人(机械技术研究所)能够靠压缩空气驱动,机械手插入床下将被护理者平端起来。这一类机器人需要克服患者的体重,故其外形尺寸很大,由于与人直接接触还存在安全性问题,因此目前尚未进入实用阶段^[21]。

护理支援机器人“Regina”(日本 Logic Machine 公司)(图3.5)的垂直多关节双臂的末端执行器安装了一个类似躺椅的患者支撑面,靠它的行走功能能够将患者从床上移转到专用浴缸中,帮助患者入浴。利用它的一只手臂,通过无线遥控方式操纵还能更换尿布^[22]。

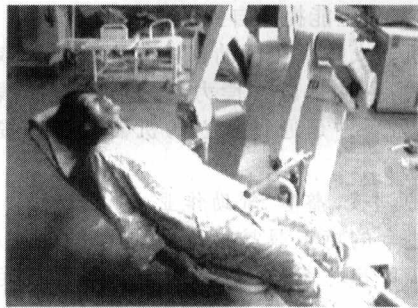


图 3.5 Regina 机器人(日本 Logic Machine)

自古以来人们就有身披外骨骼型铠装(exoskeleton)作业的梦想,这样既不失灵巧性又能增强自身的力量。限于当时的条件,这个梦想显然是无法实现的。图 3.6 给出一个压缩空气助力外衣(神奈川工科大)^[23],它就属于外骨骼型的铠甲,穿着在护理者的身上能起到增力的作用,可实现抱起作业。

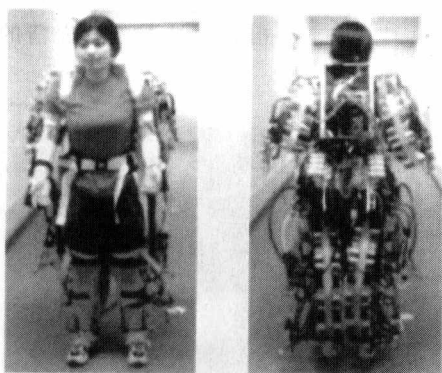


图 3.6 助力外衣(神奈川工科大学)

护理作业是按照人可能实现的作业方式来建立作业体系的,因而往往让人误解只要将其照搬到机器人上就行了。实际上需要回到机能分析的层面上去构建一个以患者为中心的实用系统,当然机器人也是一个可供考虑的方案。

2) 观察、心理支持

在护理中仔细观察对象的健康状况是十分重要的。护理场所包括医院、医疗设施、患者长年居住的住所等。如果在患者自己的住所进行护理,往往需要专业人员。

下一节我们会涉及精神慰藉机器人,有些精神慰藉机器人体内装有测量健康状况的传感器,所以在护助中也可以起到心理支持的作用。

4. 间接作业支援机器人

HelpMate SP 机器人搬运系统(Pyxis Corp.)的用途是负责医院内部的药品、送检物品、食物、卡片等的运输。受 NEDO 的委托,医疗福利机器研究所、富士通、安川电机合作开发了给老年人、残障者送膳的自动机器人系统,它能做到配膳、送膳自动化,这样有利于延长面对面护理患者的时间,提高护理质量^[24,25]。

间接作业支援机器人虽然不直接支援老

年人或残障者,但是它们的研发也是不可或缺的。

3.2.3 福利机器人的机能和控制

福利机器人是福利设备和福利用具的一部分,在研发福利机器人时,除了以患者为中心外,还需要同时考虑医疗和福利小组单位的需求,同时兼顾当前社会福利设备和福利用具的水平。

从上述福利机器人的应用实例可知,它的用途多种多样,但基本上都处于发展阶段,尚无定型产品。它的主要技术包括操作、移动、多功能、人机界面(在操作功能上还包括对对象的观察、诊断方面的传感功能(视觉、力觉、触觉等))。总之,除了移植已有的机器人基本技术和应用技术外,因为它们与人直接接触,因此对功能和控制提出了更高的要求,如柔软性、安全性(排除本质危险性),以及适度的自主性、与人类的亲和性等。

残障者是自立支援机器人的操纵者,不过他们残障的程度各不相同,因此除了基本的直接操作方法外,在实际中按照身体残存能力的不同,采取协调控制与部分机能自主控制相结合的办法是很合理的。图 3.7 为该系统的结构框图。

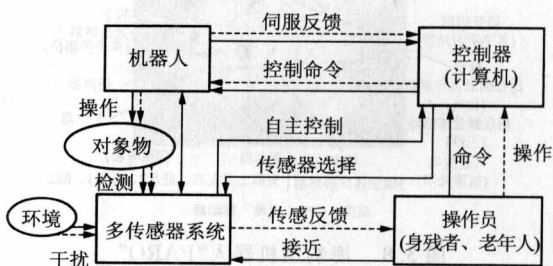


图 3.7 护理机器人的结构

佐久间一郎 藤江正克 增田良介 市川 诚

3.3 精神慰藉机器人

我们已经知道,动物疗法具有心理效果(放松、提神等)、生理效果(稳定脉搏、缓解紧张等)、社会效果(人们以动物为话题进行交流等)。不过,动物本身会引发一些其他问题,如过敏症、病症感染、咬伤、抓挠等,所以在医院或面向老年人的设施中并不适宜积极引入动物治疗。

精神慰藉机器人(mental commitment robot)是一种在医院或面向老年人的设施环境中,带来快乐或安慰等精神效果、慰藉患者心灵、丰富精神生活的机器人^[1,2]。例如,猫和狗等动物玩具已经问世,它们属于家庭常见的宠物,不过也有非家庭宠物型的机器人,如海豹型机器人。人们在进行主观评价实验时,如果是生活中常见的动物型机器人,往往会把它们与动物本身进行比较,要求比较苛刻,如果不是常见的动物型机器人,评价起来一般比较宽容。

1. 海豹型机器人结构

图 3.8 为模仿竖琴海豹幼子的海豹型机器人“PARO”。它安装有视觉、听觉、姿态、温度等多种传感器,全身在人造皮毛与本体之间布置了触觉传感器,置于体内的驱动器能让上身、尾部摆动,通过眨眼等动作能在一定程度上表现脸部的表情,在此基础上机器人再通过声音识别和交互产生动作就产生了一种鲜活的效果。由于机器人的皮毛经过抗菌加工和防污处理,因此人们完全可以放心地去触摸它们。

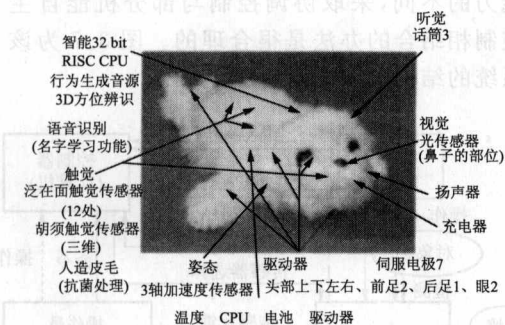


图 3.8 海豹型机器人“PARO”

(产业技术综合研究所、三协铝业)

2. 相互作用的效果

为了证实精神慰藉机器人的效果,下面介绍海豹型机器人在幼儿病区和高龄者日间服务中心试验所收到的实际效果^[3~5]。

1) 幼儿病区住院患者的机器人护理疗法

由于医院与家庭环境相比发生了变化,幼儿病区的患童往往会产生一些心理压力,住院时间越长,患童的心理问题越严重。因此,人们一直在尝试通过改变幼儿病区的建筑结构和运行方式以减轻患童的压力。

本试验在于证实精神慰藉机器人在减轻

幼儿心理压力方面的效果。幼儿病区患童分短期住院患童(数日到数周)和长期住院患童(免疫能力低下的隔离病房)。为了便于比较,分2组进行约3个月的持续试验^[3]。试验如图 3.9 所示,每天午餐前、晚餐前、就寝前分3次让被试验者与机器人接触一定时间,通过观察被试验者的表情,与图 3.10 所示的脸谱分类(脸部表情)进行比对来评价机器人的效果^[6]。护士承担观察被试验者表情的任务。



图 3.9 机器人护理疗法

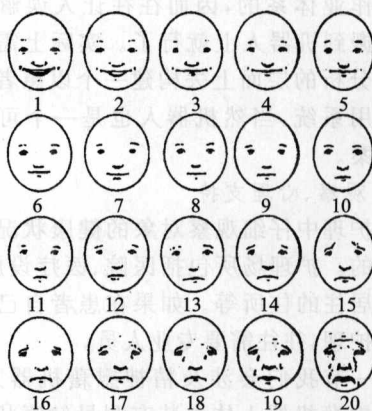


图 3.10 脸谱分类(1~20)

图 3.11 给出 16 名短期住院患童在机器人动作和静止(切断电源成为一个毛绒玩具)的不同场合下所得平均分值的比较。如果毛绒玩具静止,则不能激发出被试验者的互动,即使激发出来也无法持续。试验结果表明,让仿生机器人动作,产生与被试验者之间的互动能够提高被试验者的情绪。护士观察也证实,被试验者之间、被试验者与其监护人、被试验者与护士之间的交流增加,夜啼现象消失。特别地,连患有自闭症在 6 个月内没

有笑容、几乎失语的被试验者都有明显改善，这一点是尤其值得肯定的。可见，机器人护理疗法对幼儿病区患童具有明显的心理疗效和社会疗效。至于生理疗效，由于存在药物的影响，无法作出明确的判断，但可以肯定的是搂抱机器人之类的动作对活动身体、增进康复是有效果的。

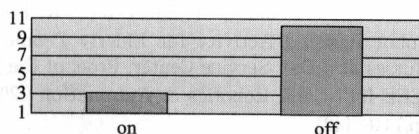


图 3.11 平均分值的比较

2) 老年人的机器人护理疗法

老年人非住宿设施——日间服务中心提供的服务内容是多样的，但大多数是属于面向普通人的规范服务，与个人心理层面相关、减轻心理压力的服务少之又少。

为了证实精神慰藉机器人在这方面的效果，进行了如图 3.12 所示的试验。在数名老年人中摆放一台机器人，按每日一次，每周 3 日的频率进行试验，历时 5 周。心理效果同样通过机器人互动前后患者脸谱分类和针对被试验者抽样作主观评价来进行判定^[4]。图 3.13 给出了 6 周时间内 12 名被试验者的脸谱分类平均分值的变化曲线，由于第 6 周并未与机器人接触，因此缺少交互的数据。试验结果表明，通常情况下老年人的情绪时好时坏，与机器人互动后则始终保持良好的状态。此外，还从被试验者的尿样检查结果确认，在与机器人互动后出现生理效果，紧张情绪得到缓解^[5]。数据结果证实，个人对机器人的主观评价越高，则治疗的效果越好。通过对被试验者的观察确认了机器人在增进交



图 3.12 机器人看护活动

流和增加笑容方面的效果。

另外，根据对参与试验的护士和护理师的抽样调查，也证实了上述试验可以起到缓解老年人心理紧张程度的作用。

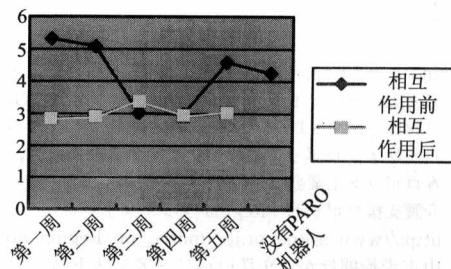


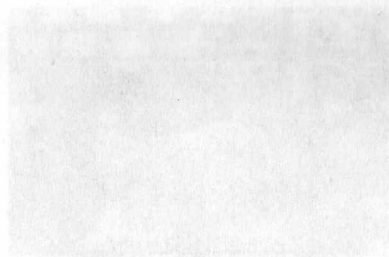
图 3.13 老年人的脸比例尺平均分值的折线图

柴田崇德

参考文献

- 3.1 福利事业的基础, 3.2 福利设备、机器人
- [1] 鈴木幸雄編：介護福祉用語辞典ハンドブック，保育社（2001）
- [2] 千野直一，木村彰男編：リハビリテーションレジデントマニュアル（第2版），医学書院（2001）
- [3] 中園康夫，N.E.バンクーミッケルセン：—その思想—，海外社会保障情報，No.105（1993）
- [4] 津山直一監修：標準リハビリテーション医学（2版），医学書院（2000）
- [5] 生田宗博：ADL 作業療法の戦略・戦術・技術，三輪書店（2001）
- [6] TEM ホームページ，
<http://rehabili.reha.med.keio.ac.jp/groups/ktrc/world/research/tem/TEM.htm>
- [7] 井手隆俊ほか：歩行治療用ロボット（AID-1）の開発と臨床効果，人工臓器，Vol.17（1988）pp.769-772
- [8] 藤江正克ほか：歩行訓練装置の実用化，精密工学会学術講演会講演論文集（1）（1997）pp.457-458
- [9] 竹内郁雄ほか：歩行支援機器の開発，JRSJ，Vol.21，No.4（2003）
- [10] 榊泰輔ほか：下肢機能回復支援システム，JRSJ，Vol.21，No.4（2003）
- [11] InMotion 2，<http://www.interactive-motion.com/>
- [12] 四宮葉一ほか：乗馬療法機器の開発と筋力増加の効果検証，松下電工技報（Dec.2001）pp.69-74
- [13] The design of a five-degree-of-freedom powered orthosis for the upper limb, Instn Mech Engrs, 215 (Part H) (2001) pp.275-284
- [14] 斎藤之男：福祉ロボット，JRSJ，Vol.21，No.4（2003）
- [15] 藤本浩志：多機能動力義足，JRSJ，Vol.14，No.3（1996）pp.20-23
- [16] M. Whittaker：HANDY 1 Robotic Aid to Eating：A Study in Social Impact, Proc. RESNA Int. '92（1992）pp.589-594

- [17] G. Verbarg et al.: An Evaluation of the MANUS Wheelchair-Mounted Manipulator, Proc. RESNA Int. '92 (1992) pp.602-604
- [18] 手嶋教之: 食事支援マニピュレータとその要素技術, JRSJ, Vol.14, No.5 (1996)
- [19] 増田良介ほか: 箸機能をもつ食事介助ロボット, 日本ロボット学会学術講演会 (2003)
- [20] S. Tachi et al.: Guide Dog Robot - its basic plan and some experiments with MELDOG MARK I, Mechanism and Machine Theory, Vol.16, No.1 (1981) pp.21-29
- [21] パーソナルロボットの標準化に関する調査研究, 日本ロボット工業会 (1997)
- [22] 介護支援ロボット「Regina レジーナ」
http://www.nsknet.or.jp/~morix_am/Reginal.html
- [23] 山本主治郎ほか: 介護用パワーアシストスーツの開発, 日本機械学会論文集 (C), Vol.67, No.657 (2001) pp.1499-1506
- [24] Helpmate Homepage, <http://www.pyxis.com/>
- [25] 藤崎正昭ほか: 高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム, JRSJ, Vol.14, No.5 (1996) pp.7-11
- ### 3.3 精神慰藉机器人
- [1] T. Shibata et al.: Emotional Robot for Intelligent System—Artificial Emotional Creature Project, Proc. of 5th IEEE Int'l Workshop on ROMAN (1996) pp.466-471
- [2] T. Shibata and K. Tanie: Influence of A Priori Knowledge in Subjective Interpretation and Evaluation by Short-Term Interaction with Mental Commit Robot, Proc. of the IEEE Int'l Conf. On Intelligent Robot and Systems (2000)
- [3] T. Shibata et al.: Mental Commit Robot and its Application to Therapy of Children, Proc. of the IEEE/ASME Int'l Conf. on AIM'01, paper number 182 and 6 pages in CD-ROM Proc (2001)
- [4] K. Wada, T. Shibata, T. Saito and K. Tanie: Robot Assisted Activity for Elderly People and Nurses at a Day Service Center, Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. Robotics & Automation (2002) pp.1416-1421
- [5] T. Saito, T. Shibata, K. Wada and K. Tanie: Examination of Change of Stress Reaction by Urinary Tests of Elderly before and after Introduction of Mental Commit Robot to and Elderly Institution, Proc. of the AROB '02 (2002) pp.316-319
- [6] C.D. Lorish and R. Maisiak: The face scale, A brief, nonverbal method for assessing patient mood, Arthritis and Rheumatism, Vol.29, No.7 (1986) pp.906-909



第 4 章 机器人在特殊环境及特殊作业中的应用

4.1 灾害应对机器人

除了核反应堆机器人外,灾害应对机器人(disaster response robot)还包括消防机器人等。不过直至 2002 年,它也没有达到工业机器人那样广泛应用的程度。资料表明,救助机器人在美国纽约世贸中心大厦受到恐怖袭击时曾经用于搜索和信息收集,取得了一定的效果,可以期待它在今后会有进一步的发展。

田 所 论

4.1.1 消防机器人(fire fighting robot)

现在日本已经在多个消防总部配备了遥控消防机械,我们可以把它们视为一种现场使用的机器人。下面就截至 2002 年日本消防总部使用的消防机器人^[1~8]和今后的发展加以说明。

1. 喷水机器人

如果储油罐发生火灾,火势会很大,而且伴有强烈的辐射热,使消防员无法接近现场。如果是化学工厂发生火灾,会有剧毒物质,消防员也无法接近现场。因此,在日本东京、横滨、大阪、堺市高石市的消防联合体共 4 个消防总部配备有遥控的喷水机器人。

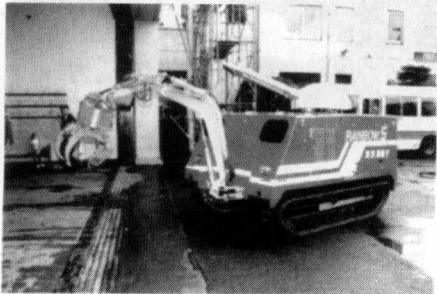


图 4.1 东京消防厅的喷水机器人外观

东京消防厅的喷水机器人^[9,10]如图 4.1 的照片所示。东京消防厅从 1987 年开始配

备喷水机器人,目前共有 4 台。

该机器人在建筑机械上加装了一个机械手。通过更换机械手末端执行器,机器人可以承担去除前方道路上障碍物或危险品的任务。

东京消防厅的喷水机器人曾经在实际火灾现场现身过。据报告,机器人取得显著消防业绩的频率大概是 1~2 次/年。该机器人是针对储油罐着火而开发的,不过现在仓库等大型空间现场发生火灾的情况渐渐增多。

横滨市消防局于 1996 年装备了喷水机器人^[11]。其基本性能指标如表 4.1 所示,机械手采用主从方式操纵。

表 4.1 横滨市消防局喷水机器人的基本性能指标

外形尺寸	3.97m×1.90m×2.38m
质 量	5000kg
动力源	柴油机 3.455×10 ⁻³ m ³
最高移动速度	2.78m/s
操纵方式	有线、无线
喷水能力	喷水容量 100×10 ⁻³ m ³ /s(水)、 50×10 ⁻³ m ³ /s(泡) 喷水距离 70m
机械手	主从式 电液伺服控制 可搬运重量 2800N 自由度 4 个 末端执行器 4 种
装备设备	摄像头:前方 2 台、后方 1 台 热图像装置 1 个 放射线检测仪 1 台 毒气传感器 1 个 可燃气体传感器 1 个 自卫喷雾装置

东京消防厅和横滨市消防局的喷水机器人需要用专用车辆将它们运输至现场,考虑到一旦发生火情调用消防机器人的紧迫性,运输机器人的车辆应该满足普通车辆的规格要求。因此,机器人的质量和尺寸将受到运

输车辆规格的制约。

大阪市消防局于1983年配备了喷水机器人,目前已经换成第二代小型化的机器人。小型喷水机器人无需专用车辆运输,它能够搭载在化学消防车上。

堺市高石市消防联合体消防总部的辖区内有大规模的炼油厂,所以也装备了具有同样功能的遥控喷水车,这种喷水车的行走系统采用轮胎。

有些喷水机器人^[9,10]还能够进入那些消防队员难以进入或无法施展的狭小空间。这类机器人体积小、质量轻,在动力源被切断时甚至能够借助于喷水反力移动,它无需专用的搬运车辆,搭载在消防车上即可。

目前,喷水机器人属于专用机器人,是按照具体的功能要求进行设计的,市场上还没有产品出售。

2. 水下搜索机器人

发生水难事故时搜救水下遇难者对于消防队员来说是一项十分沉重的工作。日本消防总部配备有水下搜索机器人(under water searching robot),它们的用途是水下救助。大阪市消防局配备的海洋机器人如图4.2所示。

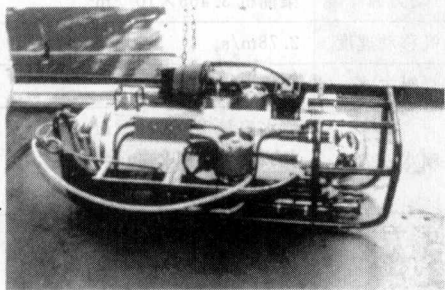


图4.2 水下搜索机器人的外观(大阪市消防局)

消防队实施救助活动的港、湾、河、川,水体的透明度不高,如果在海洋机器人上仅搭载水下搜索摄像头,由于水体的透明度低可能会给搜索活动带来困难,因此多数机器人都装有声纳装置。

有的水下搜索机器人还配备简单的机械手,用来平衡潮流或水流,保持机器人的位置和姿态。有的系统还装有机器人位置传感器。由于它主要的作业范围在港湾区,所以对潜水深度方面的要求不高。

东京消防厅的水下搜索机器人每年平均

发现1例遇难者。每当有水难事故发生,福岡市消防局几乎都要派出水下搜索机器人,每年平均出动30次左右,甚至还出现过距离岸边60m的落水车辆。福岡市消防局采用声纳检测搜索对象,因此无需让机器人移动,它们大都在固定状态下使用。

3. 侦察机器人

消防队员在进入火灾建筑物等危险区域之前,如果能够掌握现场的状况,当然就比较容易保证消防活动的安全性和有效性。

东京消防厅的侦察机器人^[9,10](reconnaissance robot)以处理爆炸物为主要目的,是从德国购入的,它装有机械手,可以打开火灾室的室门。

大阪市消防局的侦察机器人^[12]以地下街道火灾为假想对象,于2001年配备。这款机器人的越野性能很好,采用履带移动,研发人员在改进功能和减轻质量方面花费了很多心血,所以消防队员能够携带它爬越台阶,通过不平整的地面。

4. 救助机器人

东京消防厅于1993年配备了救助机器人^[9,10,13](rescue robot),它的外观如图4.3所示。它安装了两个主从式机械手,机械手和行走系统均采用液压驱动,由美国制造,而双臂主从系统则采用带电操作机器人的控制系统。

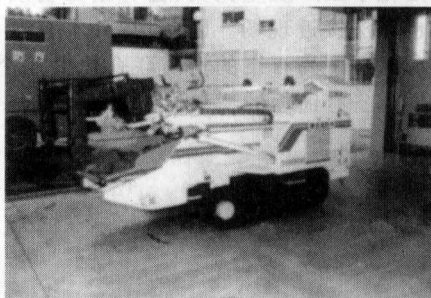


图4.3 救助机器人的外观(东京消防厅)

该机器人还能搭载护理床,可以收容被救助者,而且配备了面向被救助者的语音通话系统和空气供给装置。

5. 消防机器人展望

现有的消防机器人多数是由日本各个消

防总部自行设计、制造的,如果考虑普及性和经济性问题,那么消防机器人应该具有更高的通用性和可扩展性。市场上已经有商品化的危险物品处理机器人了^[5],同样我们有理由期待消防机器人能迈向这一步。

发生火灾、灾害时,来自现场上空的信息对消防活动十分重要。现在已经为消防和防灾配备了直升飞机,不过直升飞机在危险地区低空飞行非常困难。实际上,无人直升飞机^[14,15]已经在农业上得到广泛应用。无人直升飞机很适合消防的特点^[1~3],因此可以预测它将在消防、防灾方面进一步得到应用。

为应对高层建筑火灾,有人提出了一种多吸盘壁面攀爬机器人^[10]。但它的应用受到建筑物壁面条件的种种限制。为了克服这个局限性,有人提出了通过抓取屋外露台栏杆攀爬的机器人^[16~18],也有人建议将高层建筑的清扫和灭火功能一体化,做成一个综合系统。

目前的喷水机器人,一旦喷水,连接水管内充水的质量往往会造成机器人的行动困难,因此任何一台机器人都具有遥控拆卸水管的功能。可行的解决方案是开发水管移动机构,这样一来,喷水机器人系统就能一边喷水一边转移战场了^[9,10]。

天野久德

4.1.2 灾害应对机器人(disaster response robot)

在日本防灾工程学中,一向十分重视抑制灾害(mitigation,建造抗灾建筑物等)的问题。阪神淡路大震灾发生后,减灾(preparedness,灾害发生后避免灾害扩大)的重要性开始被社会所重视,专家的危机管理意识开始增强。

为提高减灾能力,机器人和信息技术的贡献是不可低估的。下一代防灾的基础设施工作已经不再停留在对传统的土木建筑结构的改善上了,而是期待像机器人一类的移动体发挥作用,即能够主动地将灾害减小到最低程度。

如果未来的机器人能够像汽车一样深入社会生活的方方面面,那么机器人的功能就不应该仅仅停留在支援人类功能的层面上,它同时也应该具有一定的防灾或救助能力。

例如,AIBO之类的家用宠物机器人,它们平常在家里自主地游走,收集情报,一旦遭遇灾害就能向外部提供必要的数据(成为看门狗 AIBO),发出紧急求救信号。经由蓝牙网络连接的家电也能发挥类似的作用,它们与主动收集信息的机器人协调工作,一致应对灾害,这就是新的灾害应对基础设施的概念。

在过去,一般认为普及灾害应对机器人的困难在于成本高,而灾害发生的频率往往比较低。如果我们让机器人融入社会的日常生活,那么经济壁垒就没有那么高了,相反可能成为将机器人引入社会的一个积极因素。阪神淡路大地震的调查结果表明,面对大规模灾害,由众多机器人和系统既分散又协调地搜索受害者是十分必要的。显然,只有让机器人和系统兼有日常功能,才能在常态下长时间地配备它们。

表 4.2 按照死难者人数的顺序排列了自 20 世纪以来大规模地震灾害的损失情况。表 4.3 按地区、种类分类统计了 1990—1999 年发生的各种灾害所造成的死难者人数和经济损失的估计数据^[19]。数据显示,全球灾害发生的频率相当高,联合国在减灾技术的研究开发和配备方面的投资应该是有价值的。

表 4.2 20 世纪世界上发生的大规模地震灾害

年 份	国 家	级 别	死难人数
1976	中国	M7.8	242 700
1920	中国	M8.6	220 000
1923	日本	M7.9	142 800
1908	意大利	M7.0	110 000
1927	中国	M7.9	80 000
1970	秘鲁	M7.6	66 800
1935	巴基斯坦	M7.6	60 000
1990	伊朗	M7.3	41 000
1939	土耳其	M7.8	32 700
1915	意大利	M6.9	32 600

灾害应对机器人需要开发的系统技术如下:

① 应该形成分散式的防灾机器人系统,使它成为社会基础设施之一,兼有日常使用功能。

表 4.3 世界灾害的统计(死难人数及经济损失)^[19]

灾害种类	死难人数(损失额百万美元)					
	非 洲	美 洲	亚 洲	欧 洲	大洋州	合 计
雪崩、滑坡	225	2010 (515)	5 500 (388)	644 (24)	279	8 658 (929)
干旱	12 (116)	(4 440)	2 680 (2 819)	(9 888)	98 (3 676)	2 790 (21 941)
地震	816 (282)	3 519(23 810)	91 787(183 782)	2 395 (6 893)	70 (255)	98 678 (215 023)
瘟疫	57 082	12 123	14 316	411	115	84 047
寒流、热浪	1 102 (47)	1 998 (8 251)	5 974 (3 968)	954 (2 096)	27	9 055 (14 362)
洪涝	9 487 (576)	35 598(35 975)	55 916(112 575)	2 839 (93 638)	30 (796)	103 870 (243 561)
森林火灾	79	101 (3 498)	260 (32 299)	127 (1 021)	8 (156)	575 (36 975)
暴风雨	1 612 (1149)	13 264(86 941)	185 739 (60 640)	913 (26 114)	262 (4 545)	201 790 (179 391)
火山喷发		77 (33)	994 (223)	(16)	9 (400)	1 080 (672)
其他自然灾害	(5)	15 (104)	489 (267)		2 182	2 686 (109)
人为灾害	16 136 (362)	12 353(14 661)	42 453 (4 381)	7 832 (8 496)	534 (164)	79 308 (28 066)
合计	86 551(2 537)	81 058(178 228)	406 108(401 342)	16 115 (148 186)	3 614 (9992)	592 537 (741 029)

② 防灾机器人系统应该具有高度的专业救助能力。

这样的机器人应该在感知能力、驱动能力、交互能力、信息处理能力等方面比人类更强,或者能够与人类互补,如在灾害规模、环境情况、危险性评估等方面。

1. 美国世贸中心大厦的搜索、信息收集机器人

2001 年 9 月 11 日上午 8:46 在美国同时发生多起恐怖袭击事件,包括 2 架满载燃料的飞机冲进纽约世贸中心大厦(WTC)的双子塔,造成 2752 名(据 2002 年 10 月 29 日的推测)人员遇难。

事件发生后,John Blitch(Center for Robot-Assisted Search and Rescue,USA),Robin Murphy(University of South Florida)等出动机器人开展人体搜索和信息收集等活动。到达现场的有 Foster-Miller(Arnie Mangolds)、iRobot(Tom Frost)、University of South Florida,SPAWAR(Bart Everett)4 个团体,表 4.4 给出了所使用的机器人情况。这些机器人都是履带型遥控机器人。结果,从 9 月 12 日到 10 月 2 日大约发现了 11 名受害人,不过他们都已经处于死亡状态^[20,21]。

表 4.4 NY WTC 事件中使用的机器人

团 队	机器人	传感器
Foster-Miller	Solem	Video,Striper,Audio
	Talon	Video,Gripper
University of South Florida	Inuktun micro Trac	Video,2 way audio
	Inuktun micro VGTV	Video,2 way audio
	Inuktun pipe crawler	Video,2 way audio
iRobot	PackBot	Video,FLIR,2 way audio
SPAWAR	UrBot	

上述机器人的主要用途是在现场收集信息,收集信息的种类如下:

- ① 有无生存者、有无可能性的判断材料。
- ② 遇难者、生存者的位置和状态的推测信息。
- ③ 搜索场所的优先顺序、伤员的分类(救治的优先顺序)。
- ④ 救助者、作业者的安全信息。
- ⑤ 结构毁坏状况信息(塌陷、稳定性、漏水状况等)。
- ⑥ 瓦砾中的环境信息(温度、煤气、尘埃、地面状态、有无积水、瓦砾的散乱状态等)。

由此可知,机器人收集的数据种类很多,不仅与遇难者的生命相关,还涉及供判断救

助和灾害应对活动所需的其它数据。

通过上述救助活动得出如下的结论:

① 机器人虽然不具备人类本身或狗那样的感觉能力、运动能力,但可以有效地深入到人无法进入的危险场所,或者预计有危险的场所去收集信息。

② 与鞭状搜索摄像机(search cam)相比,机器人具有诸多优点,如探测距离更长、可进入曲折狭窄的场所、传感器多、自由度多等。

③ 实现自主功能或智能的要求不太现实。

④ 机器人毕竟是人的工具,工具在使用上的方便性非常重要。事前的操作训练固然不可缺少,但更需要在产品设计阶段有十分周到的考虑。

⑤ 灾害应对专家(如消防专家等)应该与机器人技术人员和研究人员联手操作,应该把这种合作关系落实到灾害应对的组织体系或作业程序中。

⑥ 掌握机器人自身状态(位置、姿态、方向、跌倒、冲撞、被障碍物卡住、阻塞、架空、堆积、打滑、与其他地面或周围障碍物的关系、功能障碍、故障等)的感知功能非常重要。世贸中心大厦的援救说明,声音信息起到重要作用。

⑦ 应该能够在现场快速安装或修复。

⑧ 无线方式很难确保通信,有线方式更为可靠。

⑨ 有线方式有助于解决机器人的停滞问题(可以拖拽),反之,又会引起缠绕、悬空、羁绊等问题。

⑩ 对于机器人的外部传感来说辨认受害者、测量距离、绘制环境地图、辨识路径出入口、收集环境信息等非常重要。

⑪ 为适应多种感知的要求,传感器应该允许快速更换。

⑫ 根据环境条件,机器人的大小在运动过程中可以进行重构。

⑬ 完工后的清洗和维护问题。

上述结论与下面 2. 中所涉及的阪神淡路大地震中机器人应用的可行性调研结果有着惊人的相似之处。显然,上述课题与地震灾害的课题具有共性,因此两者完全可以应用同一类型的机器人。

2. 阪神淡路大地震中机器人应用的可行性调查

在阪神淡路大地震中对救助机器人和相关的信息系统进行了多方面的调查研究^[22~24]。经过整理归纳出灾害应对机器人系统应该具有以下能力:

① 信息收集和传输能力(灾害状况的了解,人员搜索等)。

② 减轻灾害的能力,包括对人的减灾能力(保护人体、急救医疗等)和对物的减灾能力(灭火等)。

以上各项所包括的更具体的内容如下:

① 适应在灾害环境下应用。

② 有足够的移动性和灵活性。

③ 具有与操作员协调、协同作业的功能。

④ 在肉体和精神上能够起到辅助和补充操作员的效果。

⑤ 在日常生活和受灾期间均能使用。

⑥ 为应对大规模灾害,机器人具有分散性,同时也应该准备多台。

⑦ 为应对各种灾害和受害情况,应提供多种解决方案。

⑧ 制定标准,具有通用性和互换性,与救助队伍的区域性和专业性无关。

⑨ 采用标准化,降低成本。

⑩ 为拓展新技术留出空间,应具有缩放性、更新性、扩展性等。

⑪ 系统应该能达到效能的最大化。

3. 灾害救助机器人的研究开发实例

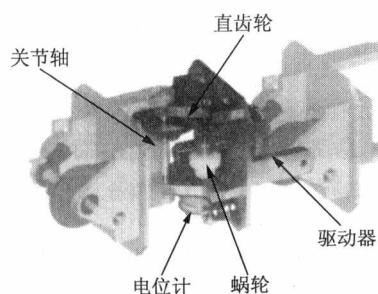
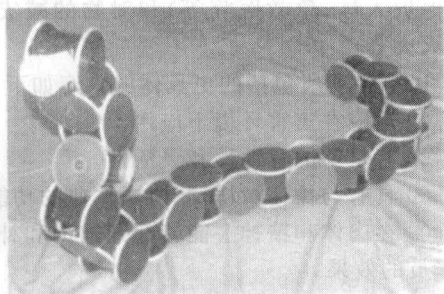
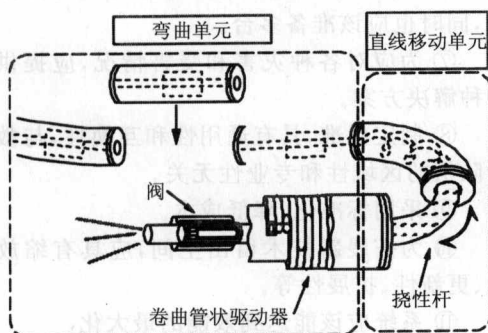
除前面叙述的消防机器人、核灾害机器人、用于 WTC 的信息收集机器人之外,目前有关灾害救助机器人的研发还不多。期望这些正处于研究阶段的机器人在未来能够走向实用。

1) 蛇形机器人

通过将图 4.4 所示的 2 自由度运动单元组合起来,松野等开发了蛇形机器人,它可以实现各种移动模式^[25]。

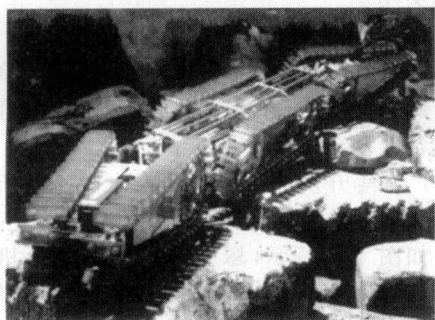
广濑等开发的蛇形机器人由图 4.5 所示的轮式运动单元组合而成^[26]。

如图 4.6 所示,塚越等研制的蛇形机器人也被称为能动管。它由压缩空气驱动沿 3 个方向弯曲的单元,通过切换产生蠕动^[27]。

图 4.4 蛇形机器人的 2 自由度单元^[25]图 4.5 蛇形机器人^[26] (东京工业大学)图 4.6 能动管 II 号^[27] (东京工业大学)

2) 履带式机器人

广濑等开发了如图 4.7 所示的履带式机器人。三条履带的弯曲由同一个电机控制，是一种能在密集的瓦砾中移动的系统^[28]。

图 4.7 苍龙 I 号^[28] (东京工业大学)

高森、小林等开发了如图 4.8 所示的多节协调的履带机器人 UVS, 能在瓦砾堆中进行搜索。

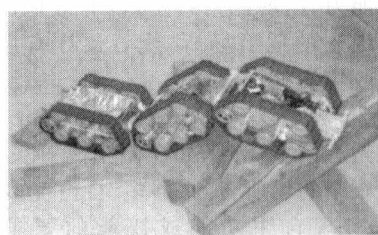
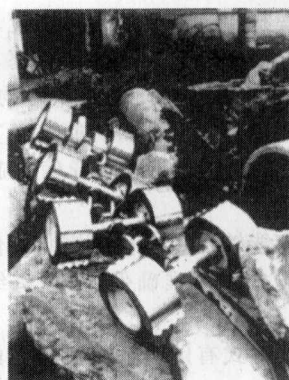


图 4.8 UVS(神户大学)

3) 轮式机器人

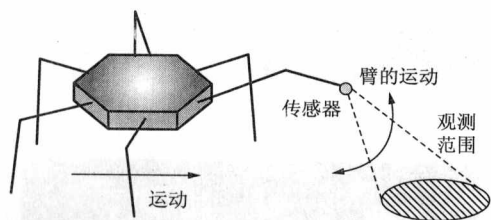
广濑等开发了多车轮单元组合式消防水管搬运机器人“玄武”(图 4.9)^[29]。

松野等提出了图 4.10 所示的轮式机器人, 它用于在灾区移动收集信息, 它不会受到信息收集人个体差异的影响, 保证能传输正确的灾害信息^[30]。

图 4.9 灭火水管搬运机器人“玄武”^[29]
(东京工业大学)图 4.10 灾害信息收集机器人^[30]
(电气通信大学)

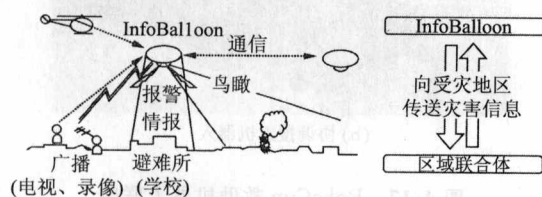
4) 腿足式机器人

新井等提出了图 4.11 所示的蜘蛛型机器人,并展开其在瓦砾内进行搜索应用研究^[31]。



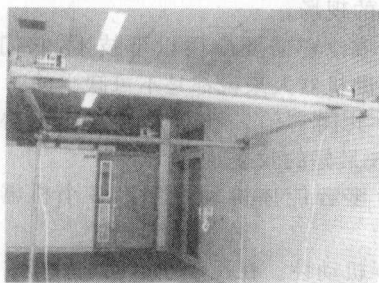
5) 空中情报收集

小野里等提出了一个利用气球从空中进行情报收集、实现通信指挥的系统 InfoBalloon(图 4.12)。



广濑等提出 Hypertezer 机器人系统,该系统先由机器人敷设一根缆绳,随后传感器头便能沿缆绳移动巡查^[32]。

图 4.13 给出田所等提出的巡查系统的原理。它用多根缆绳驱动并联机构,让传感器头产生多自由度运动。



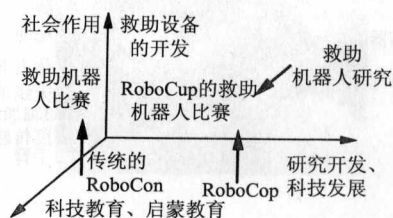
6) 智能数据终端

浅间、仓林等提出一个在灾害发生时能实现信息感知和传输的系统,它由广泛分布在建筑物内的多个智能数据盒组成^[33]。

田所 諭

4.1.3 与救助机器人相关的比赛(rescue robot contests)

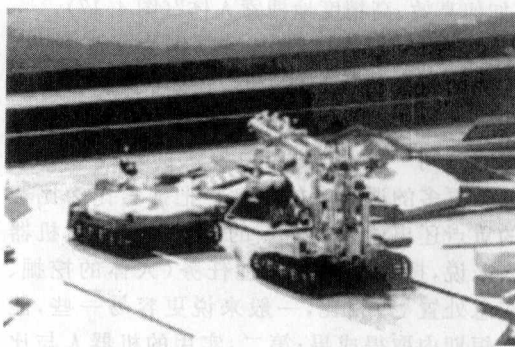
阪神淡路大地震是一个契机,使人们开始认识到灾害应对机器人的必要性,随后陆续举办了多次机器人比赛,其目的在于促进开发研究,谋求社会的支持。从图 4.14 中可以看出,许多机器人比赛的主要目的是科技教育,当然为解决这个重要的社会问题作出贡献也是机器人比赛的目的之一。



1. 救助机器人比赛

救助机器人比赛的目的是致力于与灾害及生命救援问题相关的教育和普及^[34,35]。

在图 4.15 中有一个被损坏街道的八分之一模型,比赛中让队员利用搭载在机器人身上的摄像头拍摄场景图像,遥控多台机器人,发现遇难人员,并将他们运送到安全区域。



从图 4.16 中可以看出,现场用模拟假人(偶人)充当受灾人员,其体内装有压力传感器。为了减少对人体的伤害,必须先清除周边的瓦砾然后将人体运送出来。这个比赛吸引了许多大学和高等专业的学生参加,他们提出了很多好的创意。

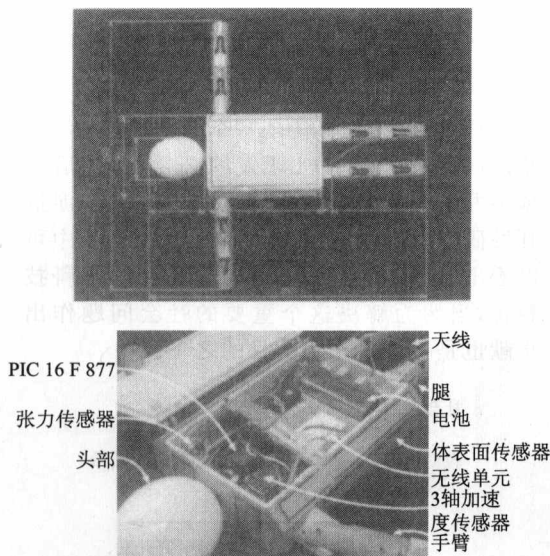


图 4.16 模拟受灾者的救助假人

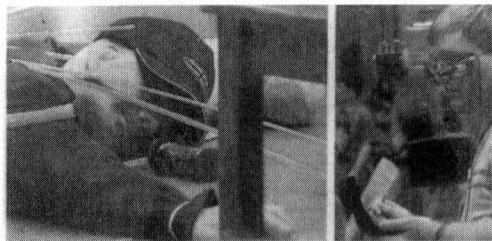
大须贺公一

2. RoboCup 救助机器人联盟

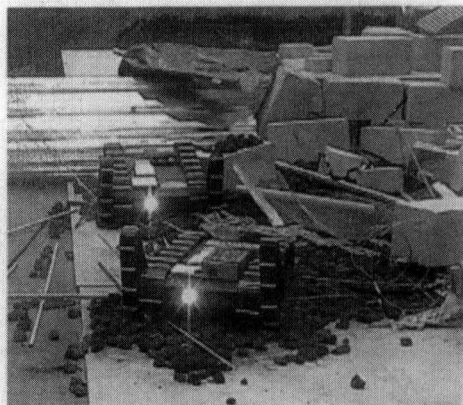
RoboCup 救助机器人联盟的宗旨是通过在尽量接近真实灾害现场的模拟环境下开展救助机器人性能比赛,直接有效地推进机器人技术的研发^[36~38]。例如,自 2001 年以来,在 AAAI 的协助下举办的比赛主题确定为在大规模地震灾害或大楼爆炸后的坍塌建筑物内,“如何高效、高精度地搜索人体”(图 4.17)。

之所以把人体搜索问题作为优先目标,是因为通过对阪神淡路大地震等实际灾害的调研发现,在灾难现场人体搜索需要花费大量的时间^[20,21],开发这项技术的最终目的是拯救更多的遇难者的生命。把搜索作为比赛的重点还出于以下两点的考虑:第一,对机器人来说,搜索任务与其他任务(人体的挖掘、应急处置等)相比,一般来说更容易一些,能在短期内取得成果;第二,实用的机器人与比赛机器人在尺寸上差不多。

这里需要特别说明一下接近实际坍塌建筑物大小的模拟比赛场地^[38]。场地由 NIST (美国商务部标准局) 开发,目的是通过制定性能评价试验的标准促进救助机器人技术的开发。场地的总尺寸为 20m×30m,按照难易程度设置以下三个区域,可以检验各种技术是否能够过关:



(a) 基于PDA的遥控小型机器人



(b) 协调搜索机器人

图 4.17 RoboCup 救助机器人联盟

① 黄色区。通常的家居,室内由百叶窗、窗帘、突起壁面、窗户、门等组成,机器人传感器识别它们时比较容易产生错误,模拟人体藏在床下,发现起来也比较困难。

② 橙色区。有楼梯、台阶、斜坡、梯子等,在这个区域可以测试机器人的运动性能。

③ 红色区。在这个区域模拟瓦砾、片状物坍塌的现场。

该项比赛需要应用以下技术,它们对实际的救助机器人来说都是不可缺少的:

① 共同自治。机器人与操作员协调作业,实现最好的救援效果。

② 多智能体协调控制。多个机器人的协调。

③ 机动性。在瓦砾中运动的性能。

④ 传感。人体和环境的识别。

⑤ 定位。当前位置和方位的识别。

⑥ 综合。IT 设施与系统的集成。

3. RoboCup 救助仿真联盟

RoboCup 救助仿真联盟是事先在计算机内绘制虚拟灾害空间,通过仿真比赛,展现出参与防灾活动的自主智能体的各种性能(评

价指标有救助人数、受害损失额度、智能体的消耗等)。

为了尽量真实地再现实地震灾害的近似情况,比赛用的自然灾害现场仿真器所模拟的灾害场景全部采用来自阪神淡路大地震的数据^[36,39~42]。灾害空间以分散仿真模块的形式通过通信将其综合起来,这些仿真模块包括建筑坍塌仿真器模块、街道堵塞仿真器模块、火灾火势蔓延仿真器模块、交通流动仿真器模块、地理信息系统(GIS)、市民自律智能体等。这些仿真器模块又被称为“核”。

防灾自律智能体有消防队、救助队、道路疏通队三种。类型不同的智能体具有不同程度的感觉机能(看、听)、交流机能(说话、无线通信)、行动机能(移动、灭火、救助、道路疏通),它们可以在虚拟的空间中自主智能行动。

智能体目前(2002年)主要涉及的技术有以下几个方面:

① 智能体之间的协调行动。同种智能体的集中和分散,消防队与道路疏通队之间的协调关系(图4.18)。

② 智能体移动的智能。根据对闭塞状态的推测来选择移动路径,再次制定路径规划。

③ 灭火战略。推测灭火所需的消防能力,敷设防火隔离带,以防火势蔓延。

④ 疏通战略。排定疏通道路的优先顺序。

⑤ 救助战略。排定救助受灾者的优先顺序。

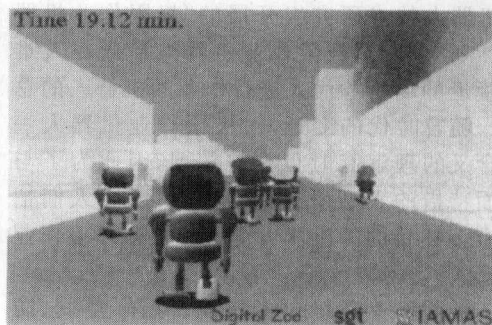
由上述可知,RoboCup的救助仿真不仅仅是简单的比赛,实际上,它在消防战略(消防力量的集中、防火隔离带等)有效性的检验、神户市长田区防灾训练、杉并区和福冈市的防灾仿真中都得到应用,推动了实际的防灾活动。

图4.19介绍了应用在RoboCup救助仿真中的实时防灾研究的主要内容。目的是利用多种灾害仿真器和它提供的环境分别进行防灾自主智能体的计算,再加以综合,构建假想灾害空间,然后在仿真环境下开展灾害、受害预测,为防灾活动的战略制定提供依据。不同智能体所制定的行动战略是通过向紧急对策总部,或者与配备穿着式计算机或PDA的救助队取得通信联络,提供决策支援,控制移动体(包括机器人在内)减轻灾害。除了在实时防灾的框架下采取防灾行动外,如何将家庭网络、分散图像感知、ITS等整合起来构建成新一代防灾社会基础设施的问题也是这个比赛的研究内容之一。

田所 谕



(a) 消防智能体的协调行动



(b) 面向儿童的人机界面

图4.18 RoboCup救助仿真

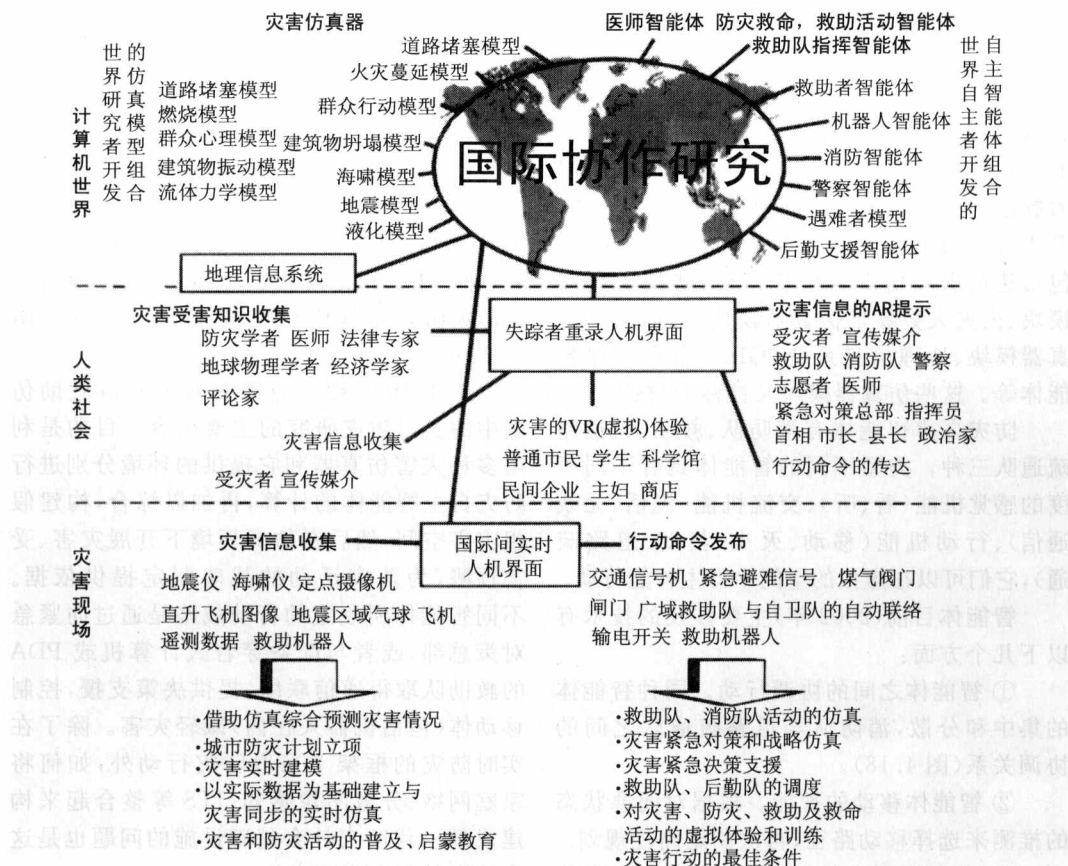


图 4.19 RoboCup 救助仿真计划概要

4.2 极限环境作业机器人

“极限作业机器人”一词来源于1983—1990年日本的大型研究计划(一般称为“大型工业技术研究开发制度”)下设的极限环境作业机器人技术研究组开展的“极限作业机器人计划”。所谓极限作业机器人是指在人难以接近的场所替代人进行作业的机器人的总称。随着时代的变迁,对极限作业机器人一词含义的理解有时也会被拓展,因此为了与上面特指的大型研究计划加以区别,人们把具有上述目的的机器人统称为极限环境作业机器人^[1,2]。

极限作业环境包括核能、海洋、空间、防灾等领域,以及20世纪90年代国际上所关心的排雷领域等。海洋、空间、防灾、排雷等领域将安排在本篇的其他章节内讲述,因此本节将就极限环境和极限作业机器人计划的基本内容加以说明,同时就它们在核能领域中的应用作一些介绍。

4.2.1 极限环境作业

极限环境作业有如下列举的场合,至于作业的内容并无明确的对象:

① 对身体负担苛刻甚至罹患后遗症风险很高的环境,人无法长时间坚持或无防护措施则无法维持生存的环境(温度、压力、声压、振动、重力、氛围气体(气压、空气成分、尘埃)、放射线等)。

② 物理环境虽然正常,但危及生命危险的风险程度很高的环境、无法预知危险发生的环境(活火山附近、地震刚过后的灾区、雷区、爆炸物处理等)。

极限环境作业机器人是适合上述作业环境的机器人,因此它们应该具有很高的可靠性。必须把它们故障限制在最低的程度,而且一旦发生故障也易于维修。在控制方面它们应该考虑以下各项:

① 属于在未知环境下作业,故操作员的遥控和机器人的自动控制两者之间必须能够

相互补充。

② 作业环境为非结构化的、复杂多样的。在多数场合下,要求作业步骤有较高的柔性,以便应对环境的变化。

③ 作业场地比较大,需要三维移动。应对移动控制需要有高速、可靠的通信手段。

4.2.2 极限作业机器人计划

极限作业机器人计划的目标是构建人、机器人系统,实现对环境的高度适应性和机动性,以满足远程、迅速、可靠控制的要求,计划的目的是开发最终能够达到实用化的关键技术。这个庞大的计划主要包括三个部分:核发电设施作业机器人(核能机器人)、海底石油生产设施作业机器人(海洋机器人)、石油生产设施防灾机器人(防灾机器人)。

这些机器人自身并不是以完全独立的系统形式工作的,它们属于上层全局监视系统(具有高度判断和决策能力)中的一个组成部分。图4.20为整个系统的概念图,图4.20中标有“自主机器人”的部分相当于我们在本节所指的极限作业机器人。

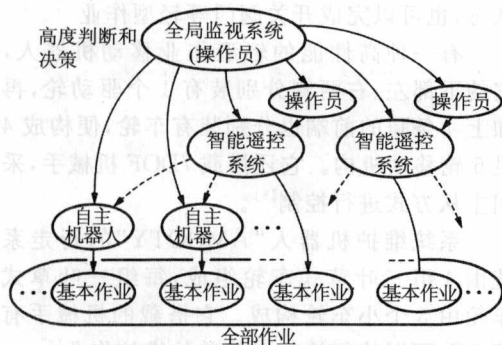


图 4.20 极限作业机器人的全局系统概况

1. 核发电设施作业机器人

开发在核电站等核能相关设施内进行作业的机器人,其任务是在环境内移动,在操纵员远程遥控的支持下实施核反应堆机械设备的检查、修补等复杂作业,以达到减轻作业人员辐射和劳动强度的目标。核电设施的维护作业大多在放射线环境下进行,虽然作业空间比火力发电站大一些,但它环境复杂、场地狭窄,有些地方还有阶梯,地面上管道纵横交错。为了应对上述移动环境,只有依靠多足移动机器人对核设施中的重要机械设备进行

维护、检查、修理。这样的极限作业机器人是整个核电设施作业机器人系统的中心研究课题。

图4.21所示的核能机器人样机包括眼睛(高速视觉信息处理)、触觉、多指多关节手等,组成一个可以完成自主作业或由操纵员遥控作业的系统。



图 4.21 核能机器人样机
(极限作业机器人技术研究组合)

2. 海底石油生产支援机器人

本计划的目标是开发水下作业机器人(无人潜器),负责海底石油开发设备——海底石油开采平台的维护、检查、修理作业任务。作业中机器人能够得到远程操纵员的支援,在水下作三维移动,调整作业所需要的位置和姿态,完成复杂任务。图4.22给出装有水下机械手的海洋机器人样机。



图 4.22 海洋机器人样机
(极限作业机器人技术研究组合)

3. 石油生产设施防灾机器人

该计划所开发的机器人是当石油生产设施发生事故的时候,在得到操纵员远程支援的背景下向灾害现场移动,了解灾害状况、防

止灾害扩大、实施救助的极限作业机器人。整个系统的概念设计已经完成。图 4.23 给出了可越障的移动机器人样机。

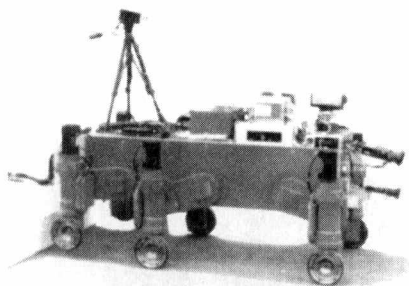


图 4.23 防灾机器人样机
(极限作业机器人技术研究组合)

4.2.3 核设施与机器人

日本的核设施有沸水反应堆(BWR; Boiling Water Reactor)、压水反应堆(PWR; Pressurized Water Reactor)两种,此外还有核燃料回收处理工厂等各种核设施。

核电设施的维护作业大致分为三种:第一种是在设施运转中的“巡查和常规维护”;第二种是遵照电气事业法及相关法规的规定,停止设施运行,进行机械装置的“定期检查”;第三种是发生事故时的“异常事故应对”。核设施机器人的任务除了上述三项维护作业外,加上设施的“废弃处置”,即一共四项任务。

核电设施的维护作业是在对作业人员实行严格放射线管理的条件下开展的,放射线的辐射剂量一旦接近许用值就必须更换工作人员,这样既增加了作业人员的数量,换班也很频繁,显然会大大降低作业的效率。因此,核设施维修对自动化和遥控的呼声很高。应该指出,担负上述维修作业的装置本身的检查和维修也必须在放射线管理区域内进行。也就是说,这些装置本身除了耐放射线外,还应该具有很高的可靠性和维护性^[8]。

1. 巡查及常规维修

在运转中,人是无法进入 BWR 核电站的核反应堆密封容器内进行重要设备巡查的,所以通常在密封容器内敷设单轨轨道,让小型监视装置沿轨道移动巡查。该装置

搭载有彩色电视摄像头、红外线摄像头、话筒等,受中央控制室操作台的控制完成设备检查^[4,5]。

通风管道检查机器人(新日本空调)是在空调设备正常运转的情况下检查通风管道内部情况的机器人。

为了能在地面自由移动,进入任意位置检查,人们开发出能在炉条上和阶梯上行走检查的各种机器人。

有一种半月型履带式检查机器人,它前后各设置两对履带,并且附带半月型转向机构,其特点是可以上下阶梯且转弯半径很小。机器人有 7DOF 机械手,手部固定电视摄像头和话筒,另外还带有温度计、放射线剂量计等,电缆通过卷筒装置与机器人连接,检测数据经由电缆被传输回去^[6]。

远程检查维护行走式机械手是一个相对于本体可以独立改变角度的 4 履带式行走机构,它能在阶梯、地面有障碍物的环境中移动。机器人前部搭载 7DOF 双向主从式多关节机械手,通过电视摄像头、话筒、温度计、放射线剂量计等仪器监视容器内部设备的运行状态,也可以完成开关阀门等轻型作业^[7]。

有一种高性能的轻型作业移动机器人,它的下部左、右两侧分别装有 1 个驱动轮,再加上 4 条腿的前端也分别装有车轮,便构成 4 足 6 轮移动机构。它还搭载 7DOF 机械手,采用主从方式进行控制^[8]。

系统维护机器人“AMOITY”的行走系统由 4 组三叶草式车轮组成,每组三叶草式车轮由 3 个小车轮构成。它搭载的机械手有 9DOF,可以执行检查和简单的维护作业^[9]。

可重构履带式智能机器人利用可变履带行走系统来应对阶梯,并在阶梯上移动,它搭载了各种传感器和一个 6DOF 机械手,可以进行检查和轻型作业^[10]。

2. 定期检查

在核反应堆定期检查的设备中,实际上可以把燃料自动交换装置和 CRD(控制棒驱动机构)自动交换装置视为一种特殊的机器人。在确认核反应堆压力容器和初级管道的耐压焊接部分的完好性时,人们采用远程自动/半自动超声波检查系统。

此外,为了缩短定期检查的工期,降低检

查人员受辐射剂量的受害,节省人力,人们还开发了许多与机器人相关的设备。

在 PWR 蒸气发生器(SG; Steam Generator)内部,一组 SG 传热管道大约多达 3400 根,要求对它们定期、全数、全长地按照 ECT (电涡流探伤)方式进行检查。超高速全自动 ECT 探伤系统由可以进入狭窄空间的探针进给装置和 SG 管板部分的步行机器人(MR-3)组成,可实现高效 ECT 作业^[11]。

PWR 核反应堆容器由厚度约 200mm 的低合金钢板和内表面的不锈钢衬里组成,为确认容器的完好性,要求进行超声波探伤检查(UT; Ultra-sonic Test)。小型水下航行机器人“A-UT 机器人”有 7 轴多关节电动机机械手,通过水下模仿动作完成超声波探伤检查。它与具有水下航行和壁面移动功能的水下台车组合成一个系统,机器人的定位由水下激光位置标定系统负责^[12]。

水下检查机器人搭载电视摄像头和照明灯,由 4 副螺旋桨推动,在 BWR 核反应堆容器内的水中实施检查作业,机器人本体下方的机械手用于回收作业,耐放射线摄像头则用于强放射线区域的检查^[13]。

BWR 的水下作业机器人有水平旋转、收展和上下 3 个自由度,安装在前端的工具可以胜任核反应堆芯的检查和维护保养作业。收紧时它的尺寸为外径 $\phi 270\text{mm}$ 、长 5400mm, X 形连杆伸展臂的行程达 2000mm。机器人具有工具交换装置,故进入反应堆后可以在其内部多次作业,无需取出^[14]。

BWR 核反应堆容器检查机器人可以跟踪反应堆压力容器的焊缝作超声波探伤检查。过去的办法是事先沿焊缝固定轨道,让检查装置沿轨道移动。由于机器人采用分散负荷磁性履带,在曲面上吸附得十分牢固,因此不必再敷设轨道^[15]。

此外,人们还开发了多种用于去除放射污染物、减轻作业强度的机器人^[16,17]。

机器人技术也用于国际热核聚变实验反应堆(ITER)的反应堆内维护装置。日本原子能研究所开发了最大搬运质量为 1.2t、安装精度小于 1mm、最大伸缩长度达 6m 的热核聚变反应堆用车载式机械手。还开发了能搬运重达 4t 的壳层模块,安装精度为 $\pm 0.25\text{mm}$ 的机械手^[18,19]。

3. 异常事故应对

1) 事故与机器人

1979 年 3 月,美国三里岛核电站 2 号反应堆(TMI-2)发生反应堆内物质熔化事故;1986 年 4 月,原苏联切尔诺贝利核电站 4 号反应堆发生蒸气爆炸事故;1999 年 9 月,日本茨城县东海村 JCO 铀加工厂发生临界事故。事故起源于设备显示引发失误、操作员对异常事态处理的训练不足、违反安全操作规程、反应堆的结构对异常事态不安全、违反安全规定作业等。

TMI-2 事故发生后,卡内基梅隆大学(CMU)等开发了多种遥控移动作业机器人,其中的一部分用作事故调查。

为了进行切尔诺贝利 4 号反应堆的调查工作,美国开发了 Pioneer robot(CMU, Red-Zone Robotics, Inc.), 该机器人的原始技术取自 DOE(美国能源部)核废弃罐的机器人 Houdini(ORNL, RedZone Robotics, Inc.), 它用电动履带行走,借助于 6DOF 机械手将传感器和工具定位在特定位置上。传感器包括放射线剂量计、温度计、湿度计、耐放射线的彩色录像摄像头,作业工具包括用于试样采集的钢筋混凝土采样装置。观察录像机的显示图像可以实现 100m 距离的有线遥控操纵^[20,21]。

2) 核能防灾支援机器人^[22~25]

核能相关设施发生故障后,为了商讨事故对策、调查事故原因或处理善后,有时需要进入放射线环境下作业。如果放射线强度超过了威胁人员生命安全的水平,就需要调用专业设备或机器人去完成任务。

1977 年,德国成立了 KHG(Kerntechnische Hilfsdienst GmbH)组织,负责包括核能防灾支援机器人在内的紧急情况应对处置。机器人可搭载各种工具,如摄像头、放射线剂量计,并搭载作业机械手等。

1988 年,法国成立了 Groupe INTRA(Groupe d'INTERvention Robotisee sur Accident),该组织负责核能事故的应对处置,装备有 ERII 履带式机器人,该组织在美国 Remotic 公司生产的装置的基础上搭载了 5DOF 机械手。此外,它还装备了室外作业的遥控自动翻斗车、推土机、挖掘机等设备。

JCO 临界事故发生后,日本总结了教训,着手大力开发核能防灾支援机器人。

日本原子能研究所先后开发了系列化的远程信息收集机器人,如早期信息收集机器人 RESQ-A、详细信息收集机器人 RESQ-B、试料等信息收集机器人 RESQ-C 等。

RESQ-A 机器人为 4 轮结构,重约 50kg,以收集事故现场早期情况为目的,进入事故现场进行图像、声音、放射线剂量(γ 射线或中子射线)测量、设备温度采样等。

RESQ-B 机器人重约 540kg,除了能收集 RESQ-A 的信息项目外,还增加了室内氛围气体(温度、湿度、气压、风速、风向)和障碍物位置测量的功能,它利用履带可以爬阶梯,利用搭载的机械手可以开关门等。

RESQ-C 机器人重约 650kg,行走系统与 RESQ-B 相同,搭载在机器人上的两台机械手既可以采集污染信息,又可以采集试料(气体、液体、固体、表面污染试料等)。这些机器人都通过无线或有线的方 式由操作台遥控。

在开发 RESQ 机器人的同时,日本原子能研究所还在开展耐环境型机器人 RaBOT 的研发(图 4.24),其目标瞄准了更高层次的放射线环境作业。该机器人与后述的 MARS-A、MARS-T 相同,都采用独立 4 履带组成行走系统(有重心移动机构),可实现上下阶梯,通过双臂双向主从式机械手搭载专用工具实现门户开关和阀门操作。

在国家的资助下,财团法人日本制造科学技术中心也在进行核能防灾机器人系统的开发。现在研发的机器人有作业监视支援机器人 SMERT-K、SMERT-M(东芝)、小型轻作业机器人 SWAN(日立)、作业机器人 MARS-A、重物搬运机器人 MARS-T(三菱

重工)、耐高放射线机器人 MENHIR(Cybernetix、日商岩井)等。

SMERT-K 为轮式小型监视机器人,由操作员或 SMERT-M 将其搬运到狭窄现场,它装有摄像头、话筒、温度及湿度传感器、 γ 射线传感器、氢氧浓度计、扬声器等。

SMERT-M 机器人有两组特殊的履带可上下阶梯,并装有 4 种传感器单元,6DOF 机械臂的搬运质量为 5kg,搭载在升降台上,作业工具能够开关门,也能从事其他作业。

SWAN 利用可变形的履带上下阶梯,搭载有负载重量为 5kg 的 6DOF 机械臂,其作业任务是普通门的开关、小口径阀门的开关、涂片采集、现场控制柜开关操作、反应堆炉气/炉液的取样等。

MARS-A 的行走机构与 RaBOT 相同,装备负载重量为 10kg 的 7DOF 机械臂,作业任务为负压门的开关、2" 阀门的开关、设备管道的开孔、放射性污染去除检查等。

MARS-T 的结构类似于 MARS-A,作业任务为搬运水管、屏蔽块、操作洒水喷嘴(洒水去除放射性污染)等。

MENHIR 的行走系统由主履带和两对可动履带组合而成,配备有两个机械臂,负载重量分别为 20kg(6DOF)和 80kg(4DOF),其任务为高放射线环境($100\text{Gy/h} \cdot 10^4\text{Gy}$ 集成)下的管道切断、法兰拆卸等复杂作业或重物搬运作业。

可以想象,由于受到环境设施结构和事故的影响,上述的机器人控制变得十分复杂,在现实中采取以遥控为主,机器人自动控制为辅的控制策略。今后需要研究的关键技术如下:

- ① 电子元器件、光学元器件等的耐放射线问题。
- ② 无线控制技术的提高。
- ③ 专用工具的完善,性能的提高和改进。
- ④ 运转操作性的改善和运转操作技术的提高。

4. 解体机器人^[26]

众所周知,在中子的辐射作用下,核反应堆压力容器的强度会大大降低。事实上,在核反应堆的设计阶段就可以估计出它的使用寿命。一旦达到使用寿命就应该永久停止核

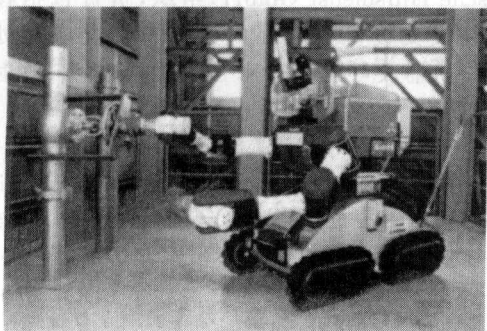


图 4.24 耐环境型机器人(日本原子能研究所)

反应堆的运行。停止运行后,即使核燃料被取出,由于堆芯部分和周围结构长期受到中子的辐射,它仍然继续处于放射状态。因此,必须对废弃的设施进行必要的处置,并加以安全、妥善的管理,这就是所谓的废弃处置。

废弃处置的依据有 IAEA、NRC 等标准。处置的方式有几种,如“封闭管理”方式(封闭整个核反应堆设施并配合环境检测)、“屏蔽隔离”方式(将具有放射性的结构置入坚固的屏蔽室内定期进行检查,外围土地照常使用)、“解体分拆”方式(将设施解体,取出放射性物质装入密闭容器封装,土地可再利用)。

日本在 1994 年的“核能研究开发和利用的远期计划”(原子能委员会)中制定了“在役核反应堆寿命到期后,应尽快解体分拆”的原则,确立了在原址上更新核电站的基本方针。

日本率先在世界上进行了利用机器人解体分拆动力试验堆(JPDR)的验证试验。今后,日本将陆续面临东海核电站 1 号反应堆、原型反应堆“富源”等的废弃处置问题,因此有必要开展解体技术的开发。

为了防止放射性物质扩散,解体时通常都保持建筑物原样不变,此时尽快降低放射线水平的措施就是先行将具有高放射能量的部分拆除,将解体后的物料装入专用容器内加以严格保管。

上面已经提及,核反应堆的空间十分有限,因此解体装置(包括机器人在内)不仅要求具有很高的耐放射性、可靠性、维护性,而且尺寸要求也很苛刻,在维护性方面还必须考虑解体装置的放射性污染去除问题,在设计上应该便于污染去除作业,减少结构的凹凸形状。在解体系统的设计上应该力求减少整个废弃量(包括外围设备在内)。

1) 动力试验反应堆(JPDR)解体验证试验^[27,28]

JPDR 的输出功率为 12.5MWe,是为日本早期核能试验研究建造的 BWR,1963 年 10 月到达临界状态,1976 年 3 月停止运行。考虑到未来商用核反应堆废弃处置时的安全(包括减少操作人员的辐射当量)、降低费用等问题,有关方面决定以解体技术、去除放射性污染技术、遥控技术为重点,对现有的技术进行实际验证,寻求有关解体的改进方法,并开发新技术。

反应堆压力容器内部的空间非常狭窄,所以拆除反应堆内部结构的步骤先从一次切断(粗断)入手,然后通过与压力容器相连的水管将结构物移动到废弃燃料池内,在燃料池内进行二次切断(细断)。一次切断采用水下等离子切割工艺,用井架式遥控系统和遥控机械手系统操作等离子割炬。井架式遥控系统有前行、横行、升降、旋转 4 个动作,升降轴的端部固定等离子割炬实现切断。7DOF 关节型遥控机械手系统为主从控制方式,操作员在距离反应堆密封容器约 50m 开外的管理区测量室中操纵从机械手(末端固定等离子割炬)进行切割(图 4.25)。核反应堆容器的切断作业靠弓锯切断装置完成。

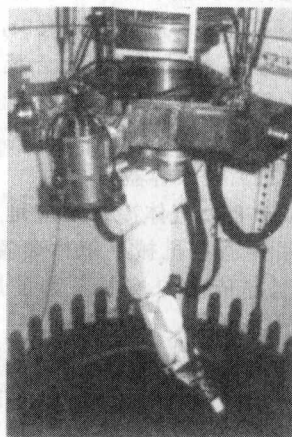


图 4.25 反应堆内结构物切断机器人
(日本原子能研究所)

将核反应堆容器外的屏蔽块解体时,由于钢筋混凝土具有放射性,应该将其切割成块状取出。为此需要由金刚石切刀和芯钻组成的机械切断装置,以及水力切割装置。这些装置与机器人技术是相通的。

2) 东海核电站的废弃处置^[29]

日本的东海核电站 1 号核反应堆于 1966 年并网发电,是日本最早的商用核电站,也是唯一的 GCR(气冷却反应堆)。由于它的发电成本比轻水反应堆高,已经在 1997 年末停止运行,2001 年 10 月经济产业省提出解体方案,决定将核反应堆(经过了大约 10 年时间的安全储藏后)解体拆除,其他附属设备在安全储藏期起始时也依次解体。也就是说,2001 年 12 月至 2017 年的 16 年间将陆续实

施废弃处置。

为了安全高效地完成核反应堆拆除工程,开发了井架式解体装置。该装置负责将直径为 18m 的球形核反应堆容器解体,并把容器内的石墨块取出,它由手臂、井架、抓取机构、控制系统、监视系统构成。手臂共有 6 个自由度,包括 3 个弯曲、1 个端部回转及整体升降和回转各 1 个,由控制和监视系统负责手臂在核反应堆内的定位。井架的回转决定方位,手臂的弯曲和升降实现连续动作。

3) 国外的例子

德国 Karlsruhe 原子能研究所的 100MWe 的重水减速二氧化碳冷却反应堆——KKN 的堆内结构物解体作业中用到旋转式遥控机械手解体装置。该机械手的水平移动距离为 8.5m,吊挂高度为 14m,搬运质量为 3t,在反应堆内可以自动更换 40 种作业工具。反应堆内众多的压力管靠机器人一根一根地切断上下两端,并从上方拔出,然后在服务区内经压力剪切断、压缩,最后装入容器。

英国的改良型气体冷却反应堆(WAGR)的拆除也用到遥控机械手解体装置,按照从核反应堆上部依次向堆芯下部的顺序进行拆除。

美国的研究用核反应堆 CP-5 解体时采用了 DAWP(双臂作业平台)和 Rosie(移动式放射性污染去除/解体作业系统)。

在比利时的欧洲化学公司的再处理厂内装备有遥控电动-液压式大功率机器人(Brokk 80),它能从事钢筋混凝土构造物的切断、放射性污染去除等作业^[26]。

柿仓正义 市川 诚

4.3 海洋机器人(水下机器人)

4.3.1 海洋的特殊性

海洋既是开展海洋学、固体地球物理学、生物学等学科调查的场所,也是海底石油资源和渔业资源开发的场所,从而产生对海洋科学观测、海洋人造物设计(海洋结构物或海底电缆等)两个方面的需求。海洋的环境严酷,人类无法轻易接近它,因此无人系统,即机器人显得尤为重要。不过对机器人的要求十分苛刻,它除了必须能抵御海水压力,能抗击海流前进外,海洋无线通信虽然可以借助

于声波传输,但传输速度(约 1500m/s)慢,传输量小,几乎不可能达到陆地机器人的实时遥控水平。要遥控,必须通过电缆与陆地或海面直接连接。

海洋环境的传感也同样麻烦,即机器人的定位相当困难。但在强烈需求的推动下,海洋机器人技术正在不断地取得进展。

4.3.2 海洋机器人的种类和发展

海洋机器人分为有缆和无缆两大类,其区别在于操作员是否靠电缆(也称为连接电缆 umbilical cable)与机器人进行连接。此外还可以按照结构、运动方式等分类,如图 4.26 所示。除了自航技术外,可以说表中所列举的水下机械的基础技术都是相通的^[1,2]。

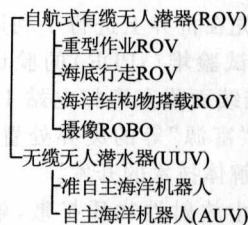


图 4.26 无人水下潜器的分类

有缆潜器的发展源于石油危机和随之而来的原油价格的上涨,20 世纪七八十年代,国际上开始对海洋石油开发进行大举投资。到 1986 年油价暴跌前,重型作业 ROV(Remotely Operated Vehicle)的原型样机已经完成,后来又开发了仅以电视摄影为目的的单功能摄像 ROBO,ROV 的种类也逐渐增加。接着,光通信技术的发展带来了海底通信电缆需求的契机,又出现了埋设海底电缆的有缆潜器。在港口建设和疏浚工程中也有一些专用的遥控潜器,不过应用实例十分少见^[1,2]。

发展无人潜器存在着能源和自动航行技术方面的瓶颈,不过随着电池技术和微处理器技术的进步,到 20 世纪 90 年代,无人潜器(UUV: Unmanned Untethered Vehicle)开始步入实用^[3]。按照声波通信方式的不同,无人潜器分为两大类:一类把重要的判断交由操作员去完成;另一类则是从潜航直至浮出水面的整个行动过程不依赖于支援母船上的操作员,靠完全自主地完成的自主海洋机器

人(AUV; Autonomous Underwater Vehicle)。显然支援母船需要花费高昂的经费,因此业界都看好不受支援母船约束的 AUV。目前(2003年),以2~3节(1节=1.852km/h)的速度长时间接近海底或海洋中层航行的观测系统已经实用化了。

4.3.3 ROV

如图4.27所示,深度潜航的大型、重型作业 ROV 大多通过一种称为收放器的中继设备与支援母船相连。收放器与母船之间靠1次电缆维系。1次电缆具有很高的强度,能同时将 ROV 和收放器吊起。下潜到给定深度后,ROV 与收放器分离,缠绕在收放器内部电缆卷筒上的2次电缆开卷。在收放器重力的作用下,1次电缆能够保持笔直而稳定的运动,便于对整个系统的操纵。不过,为了防止船体的运动造成电缆承受过大的张力,必须在船体上安装张力缓冲装置。

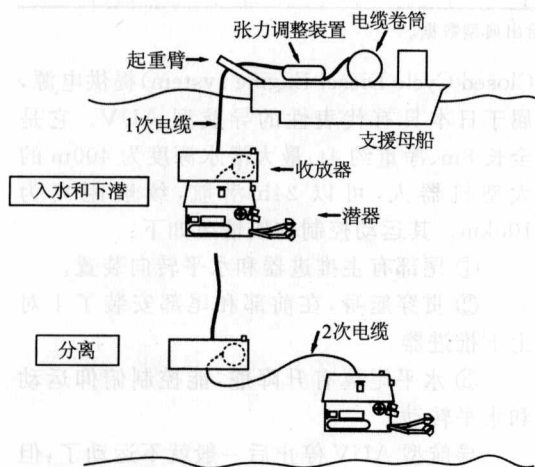


图 4.27 重型作业 ROV 的概念

在大型系统(图4.28)中通过供给的电能驱动液压泵,再用液压马达来驱动螺旋桨运转,以及机械手作业。摄像 ROBO 和小型 ROV 有时也改成电机直接驱动螺旋桨。

1995年,日本建造了可达到海洋最大潜航深度(10911m)的潜器“海沟号”(图4.29),它广泛开展了各种调查活动。遗憾的是“海沟号”的 ROV 在2003年5月发生了2次电缆断裂事故,结果遗失。

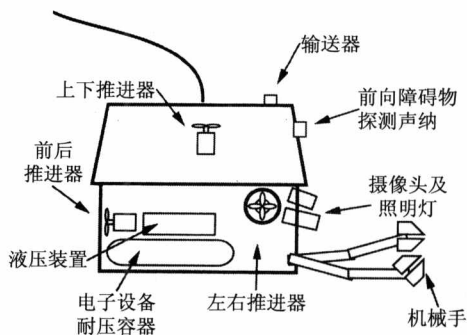


图 4.28 重型作业 ROV 的零件图

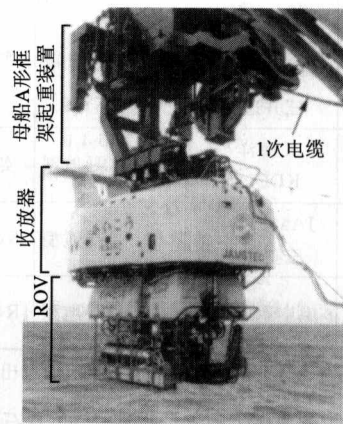


图 4.29 “海沟号”照片(JAMSTEC)

4.3.4 AUV

1. AUV 的开发

ROV 的运动受电缆的制约无法覆盖广阔的海洋,也难以在复杂的海下结构物内部进行作业。与之相比,无缆潜器不带电缆,对运动无约束,不过它对周围环境的识别非常困难,需要在自主性能方面加大研发的力度。与陆地机器人相比,海洋机器人的试制需要花费更大的开销,而且海洋试验也不简单,所以实际上要开展多种形式的研究开发计划有很大的难度。

2. AUV 的实例

保持在中等深度或距海底一定高度上巡航,用于观测海水或海底形状的 AUV,由于任务简单,开发起来比较容易。世界上最早执行观测任务的实用调查 AUV 是美国韦奇普尔海洋研究所的 ABE(Autonomous Benthic Explorer)^[4]。东京大学生产技术研究所和三井造船共同开发的“r1 机器人”于2000年10

表 4.5 截至 2003 年 4 月日本在役的(含开发试验)AUV

名称	开发组织	建造数量	种类	目的	建造	质量/kg	计算机	OS	设计深度/m
Twin-Burger 号	东大生研	2	高性能	R&D	1992	118	NS GXM, 200MHz (Pentium 互换)	RTLinux3.0	50
r1 机器人	东大生研/ 三井造船	1	导航型	实用	1995	4 000	MC 68040, 25MHz (2xPEP-9000VM40)	Vx-Works Tornado 2	400
水下搜寻者 2 号	KDDI 研	2	导航型	实用	1997	260	MC68060	Vx-Works Tornado 2	500
干船坞号	东大生研	1	高性能	R&D	1999	174	3xPentium MMX, 233MHz	Windows NT	100
淡探号	东大生研/ 琵琶湖研/ 建设省/ 三井造船	4	高性能	实用	2000	180	MC68060, 50MHz(PEP-VM62)	Vx-Works Tornado 2	110
水下搜寻者 2000 号	K 海洋/ KDDI 研	2	导航型	实用	2000	300	486DX66 (2xPCM-3346)	Vx-Works Tornado 2	2000
里岛号	JAMSTEC/ 三菱重工	1	导航型	R&D	2000	7 500	MC68060, MC68040	Vx-Works Tornado 2	3 500
海鹰号	川崎工业	1	导航型	R&D	2001	1 300	MPC750 PowerPC, 233MHz	Vx-Works Tornado 2	100

注:因为建造了多台 AUV,故规格可能有出入,这里仅给出典型数据。

月成功地完成了伊东市冲海上的手石海丘的全自动勘察^[5],对海底火山口进行录音拍照。2003 年建造了“r1 机器人”的第二代, AUV 机器人“r2D4”^[6],不断取得海底勘察的佳绩。KDDI 研究所开发了“Aqua-Explorer 2”, AUV 虽然并不能完全自主航行,但在海底电缆的勘察中取得了大量成绩。表 4.5 列出了日本正规的 AUV。

在世界上很少有以摄像头拍摄的图像为根据进行识别和判断的 AUV,其原因有两个:①水下图像的特征很少,识别困难;②照明必须达到要求。从东京大学生产技术研究所的试验平台“Twin-Burger”机器人^[7]系列发展起来的“干船坞 1 号”^[8]和专门用于琵琶湖水勘察的“淡探号”是少数的几个成功实例之一。

1) r1 机器人

r1 属于导航型 AUV,利用惯性导航装置、深度计、高度计、前向搜索声纳等数据完成自主导航,设计任务是长距离、长时间导航。

r1 机器人如图 4.30 所示,它在 1995 年完工,其特点是用封闭式柴油发电机(CCDE:

Closed Cycle Diesel Engine system)提供电源,属于日本具有代表性的导航型 AUV。它是全长 8m、净重约 4t、最大潜水深度为 400m 的大型机器人,可以 24h 潜航,续航里程为 100km。其运动控制构成情况如下:

① 尾部有主推进器和水平转向装置。

② 贯穿艇身,在前部和尾部安装了 1 对上下推进器。

③ 水平尾翼有升降舵,能控制俯仰运动和水平转动。

导航型 AUV 停止后一般就不运动了,但是 r1 机器人安装了上下推进器,故在前后运动停止后仍可以实现垂直升降,这种结构设计的目的旨在扩大其观测范围。

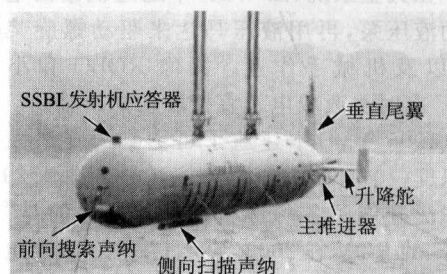


图 4.30 从母船吊放入水的 r1

r1 机器人的第二代机型 r2D4(图 4.31 和图 4.32)在能源方面改成了锂离子电池,续航时间缩短至 12h,潜航深度则加深到 4000m,质量约 1.6t,属于中型机器人。它的形状和控制方式仍然沿袭了前一代机器人,因此只花了短短两年的开发时间就实现了下海观测。

开发海洋机器人的一个重要课题是从母船将收放器吊放入水的作业和任务结束后的提升作业。如果母船的声波测位装置能够跟踪机器人,那么比较容易发现机器人,然而一旦机器人游失,没有任何线索的话,就几乎无

法再捕捉到它的信息。因此,r1 和 r2D4 机器人上都安装了上浮使用的 GPS 装置、卫星通信装置、无线 LAN、无线视频、闪烁灯等装置。在上浮过程中由 GPS 确认位置,利用卫星通信向母船操作员通知当前位置,这些安全装置对海上运行都是十分必要的,不过这也会加大机器人的结构尺寸,图 4.33 给出机器人和母船之间通信系统的模式。原则上,能够



图 4.31 最新 r2D4 中型 AUV(东京大学)

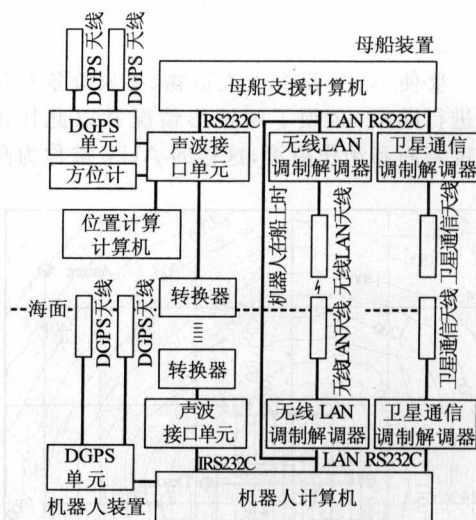


图 4.33 机器人的通信系统
(上浮时使用无线电波)

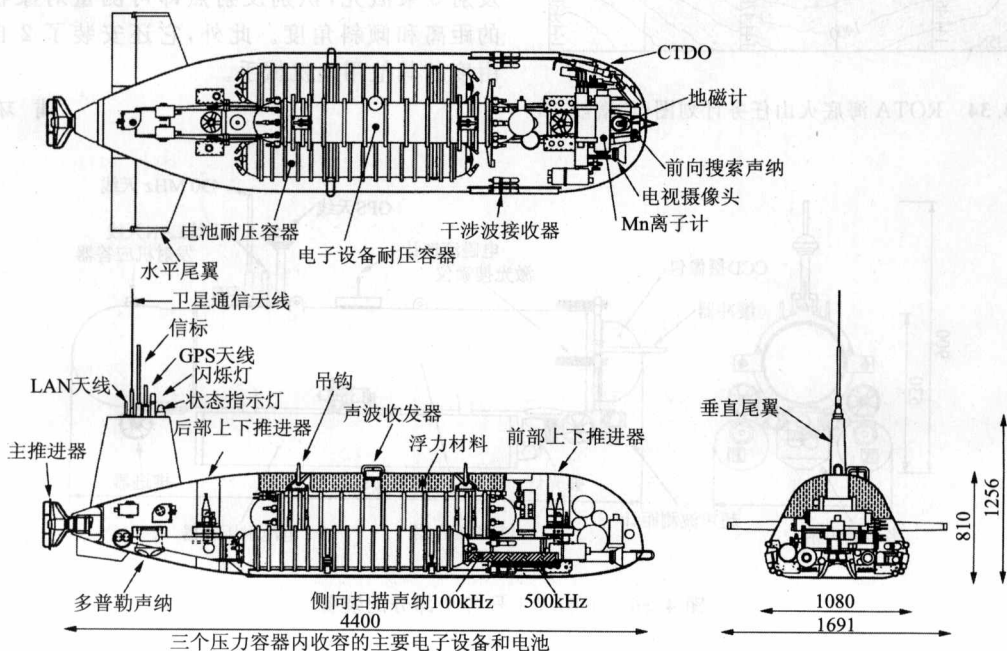


图 4.32 海洋机器人 r2D4 的结构

自主航行的 AUV 不需要声波水下通信,之所以装备声波通信装置,是为了操作员能够监视机器人的状态,或者在紧急时刻发送命令。
r1 机器人的通信速度为 100bits/s。

图 4.34 为 r2D4 于 2004 年 5 月在马里亚纳海域的 ROTA 海底火山实施的一次行动计划。机器人按照经度、纬度和深度依次通过给定的航线点,其间执行指定的动作(维持一定高度航行或维持一定深度航行等)。

2) 干船坞 1 号

要使 AUV 沿海上人造物、温泉等狭窄区域进行勘察,必须了解地形情况并以此作出高度判断和动作决策,这样的 AUV 被称为高

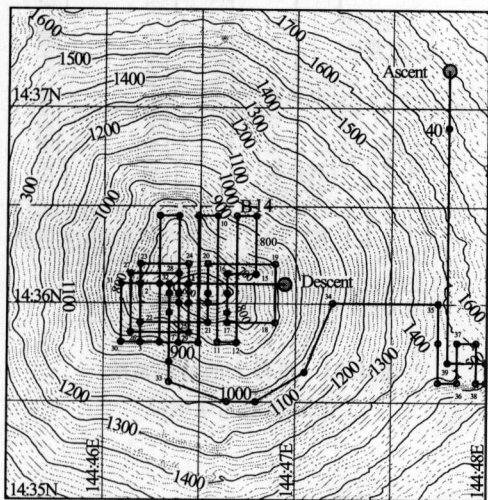


图 4.34 ROTA 海底火山任务计划图(约潜航 7h)

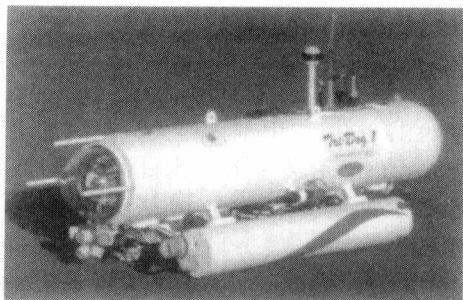


图 4.35 干船坞 1 号照片(东京大学)

智能型。导航型的 AUV 是按照机器人的续航距离来进行评价的,而高智能型 AUV 要求沿特定区域范围内实现 6 自由度运动控制,完成针对对象物的观测或操作。高智能型 AUV 的关键技术在于对象物的识别,一般都是通过声波测量数据完成对象物识别的,但是在目前水平下,二维数据得到的分辨率很差,噪声很大,不适合高智能型 AUV。学习陆上机器人的经验后,现在的做法是在 AUV 接近对象物时,先取得图像再作出行动决策。

图 4.35 和图 4.36 所示的“干船坞 1 号”就是为实现上述动作而研发的。机器人以 NiDd 电池为能源,配备了 6 组螺旋推进器执行运动控制,安装在头部丙烯半圆罩内的全景摄像机可以观测前方情况。同时,它还能发射 3 束激光,识别反射点即可测量对象物的距离和倾斜角度。此外,它还安装了 2 自由度的其他用途机械手。

浦 环

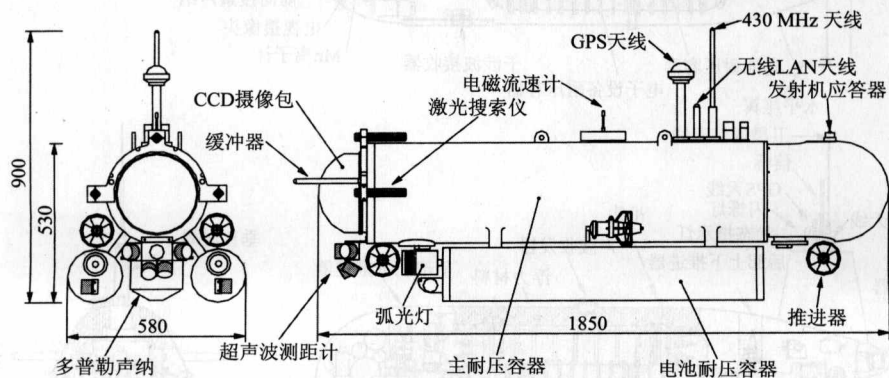


图 4.36 干船坞 1 号各个部分的装备

4.4 空间机器人

空间机器人大致可以分为在地球低轨道运行的轨道机器人(on-orbit robot)和在月球、行星等天体上移动的行星机器人(planetary robot),作用不同其功能和形态也多种多样。

4.4.1 轨道机器人

轨道机器人的任务是在失重状态下对人造物实施作业。在宇宙飞船的内部和外部,由于环境和作业的差别很大,可以分为舱内机器人(intra-vehicular robot)和舱外机器人(extra-vehicular robot)两大类。

舱内机器人处于大气环境中,通常完成程序化作业,如为实验台更换试件、操作试件等,要求承受发射时的震动并保证舱内作业的安全性,它属于工业机器人技术的延伸。

舱外机器人必须在严酷的宇宙环境中进行工作,作业任务包括结构物装配、设备更换、检查、保养、卫星回收等,形式多样且不确定,因此面临的关键技术颇多。舱外机器人分为起重型(操作大型对象物)、精密作业型(进行细微作业)、自由飞行型(free flying,绕宇宙空间自由飞行)等几类。

起重型舱外机器人的例子有航天飞机和太空站使用的机械手,它们已经进入实用阶段。精密作业型的例子有 ETS-VII 等,也已进入太空试验。日本和加拿大开发的空间站精密作业型舱外机器人已经十分接近实用程度。自由飞行型舱外机器人,如用于检查的摄像机器人,已接近实用程度,正在经受空间实验,不过由于要求作业自主性很高,还处于研究阶段。

轨道机器人的关键技术主要有:①适应宇宙环境的硬件技术;②失重状态下的运动控制技术;③高自主性和作业技能;④从地面操控机器人的人-机器人接口技术等。前两项为宇宙飞行的固有技术。尽管后两项技术与地面机器人有共同之处,但由于面对的是宇宙空间,人无法接近,通信又受到严重制约,因此要求十分苛刻。

硬件技术^[1]方面的问题,除机器人的机械结构必须承受发射过程中产生的震动、冲击,体积小、质量轻之外,同时还要求采用固体润滑剂(在超高真空环境中长期使用),耐

放射性的传感器和处理器,能承受热真空、放射线、原子氧的复合环境的材料,再就是独立、小型、高功率的能源装置等。

想象自由飞行机器人捕捉浮游物体的作业,就容易理解在失重状态下运动控制的困难性。首先,它必须完成对象物的探索、识别、相对距离和速度的测定、运动物体状态的估计等。为此,往往要将对象物做出棱角,安装 LED 等标记。中距离的测量借助于激光束,在接近状态下则借助于图像传感器。飞行移动则采用路径规划和导航控制,原则是避免碰撞,减少推进剂的消耗。

在捕捉对象物时,由于会受到手臂动作的反作用力影响,自由飞行型空间机器人的本体将产生运动,因此要求手臂和本体的协调控制。由于在抓取的过程中伴有动能的转换和动力学变化,还要求制定与此相适应的控制策略。对于浮游机器人,作反作用的影响下,仅凭最终状态的关节角无法唯一确定惯性空间中手臂末端的位置,还要依赖于动作历程。因此,需要开展手臂轨迹规划的非完整约束系统运动学^[2]研究。

地面机器人的手部末端速度控制经常采用分解速度控制(借助与关节角速度有关的雅可比矩阵),我们已经知道,如果能够根据线运动量和角运动量的守恒定律导出浮游机器人的扩张雅可比矩阵,那么地面的控制律就能够适用^[3]。在动力学控制方面,如果在广义坐标系(平移和旋转的 6 个自由度,以及手臂自由度)来描述运动学方程,即用扩张的逆动力学的形式即可,那么地面上的逆动力学控制方法同样适用。文献[4]很好地总结了失重状态下的机器人运动学的控制问题。

由于存在重力影响,许多轨道机器人在地面上是无法真实运动的,因此在开发试验和研究中需要借助于失重仿真器^[5]。人们研发了各种失重仿真器,例如,在少摩擦自由平面上建造的空气轴承式、利用水浮力获得平衡状态的水槽式、飞机或跳伞塔等的自由落体式,此外还有平衡重锤式、伺服台式(利用伺服机构的计算机控制,模拟虚拟的无重力运动)等。上述各种方法各有千秋,应该根据使用的具体要求区别应用。

至于自主性,则寄希望于以现实世界为对象的人工智能技术的提高,但是目前尚处

于实验室研究阶段。以空间机器人的研究为契机,有人提出所谓的遥控机器人学(telero-botics)的概念^[6]。遥控机器人学介于自主与遥控之间,属于一项空间机器人和地面操作者彼此分享技能和智能,实现机器人作业的技术。

遥控机器人学的含义是在定型作业阶段或局部控制以自主为主,而非定型作业阶段则需要人的判断,所以加入了遥控。迄今,人们一直在研究人与机器人角色分配的规划问题、协调方法、各个控制层的介入方法等。应该强调,对象物应该被设计成更适合机器人作业的形式,这对于自主性的实际应用具有十分重要的意义。

提高机器人技能的关键在手部。多指、多重传感器的手部、各种末端工具的研究和太空实验正在实施中。设计空间机器人手部

的前提是不允许发生这样的过失,即将对象物无意间释放到太空中去。

人-机器人交互界面的主要研究题目集中在地面操作的临场感、通信时间延迟、通信容量限制的补偿、操作的方便性等。从地面上操纵轨道机器人,由于电波传输的延迟和数据分组的原因通常会造成5~10s的通信时间延迟,不便于操作。为此,可以采用所谓的遥控预测显示法^[6]。该方法借助于实时仿真器以图形的形式呈现机器人的动作,对操作员视觉来说并不造成延迟的感觉。另外,提出了所谓虚拟现实(telepresence)的临场感操作概念,并在进一步向人工现实感操作技术发展。

4.4.2 轨道机器人的实例

表4.6归纳了正在服役或即将服役的轨道机器人的实例。并在下面逐一进行介绍。

表 4.6 轨道机器人的开发实例(开发单位为发射时的名称)

种 类	名称(开发单位)	发射时间	任务概述	机器人特征
舱内机器人	ROTEX (德国 DLR)	1993.4	在航天飞机的空间实验室的实验台内进行接线柱拆装、结构物组装、浮游物捕获等技术实验	<ul style="list-style-type: none"> 精密作业型 多重传感器抓持手 传感器与远程编程
	Charlotte (美国 MDAC)	1995.2	在航天飞机的空间实验室内进行实验台的开关操作等技术实验	<ul style="list-style-type: none"> 由钢丝绳张力实现6DOF控制 箱型
舱外机器人	SRMS (加拿大 Spar)	1981.11 启用	航天飞机舱外作业实用系统。用于卫星轨道投入、捕获、航天员操作和舱外作业场等	<ul style="list-style-type: none"> 起重型(6个自由度) 臂长15.2m、重410kg 套装式末端执行器
	MFD (日本 NASDA)	1997.8	太空站JEM实用前,在航天飞机上进行的子机械臂先期性能验证实验。内容有ORU拆装、门开闭等	<ul style="list-style-type: none"> 精密作业型 臂长1.3m、6自由度机械臂
	AERCam (美国 NASA)	1997.11	从航天飞机行李仓释放,利用摄像机开展了飞行检测技术实验	<ul style="list-style-type: none"> 飞行型摄像机器人
	ERA (日本 NASDA)	1997.11	基于ETS-VII的轨道服务技术实验。内容有装置交换、姿态控制系统的协调控制、桁架操作、天线联结机构操作等作业	<ul style="list-style-type: none"> 精密作业型 臂长2m、6自由度机械臂 地面遥控
	ARH (日本 MITI/ETL)	1997.11	基于ETS-VII的精密作业技术实验。内容有接头拆装、螺栓拆装、接线、太阳能帆板展开、试料回收等作业	<ul style="list-style-type: none"> 精密作业型 3指多传感手、小型手臂(0.5m) 传感器融合遥控机器人学

续表 4.6

种 类	名称(开发单位)	发射时间	任务概述	机器人特征
舱外机器人	SSRMS (加拿大 CSA/MDR)	2001.4 启用	国际空间站装配、大型装置搬运 实用系统	<ul style="list-style-type: none"> • 起重型 • 全长 17.6m、重 1500kg、操作质量 100t • 搭载在台车上移动和进行尺蠖步行移动
	SPDM (加拿大 CSA/MDR)	预计 2006 年左右	国际空间站的装置更换、检查等 服务的实用系统	<ul style="list-style-type: none"> • 精密作业型 • 全长 3.5m(可装拆 SSRMS) • 双臂、全部共 15 个自由度
	JEMRMS (日本 JAXA)	预计 2006 年左右	国际空间站的日本实验段暴露 部分服务的实用系统	<ul style="list-style-type: none"> • 母子式(子臂可拆装) • 母臂为 10m 起重型(6 个自由度) • 子臂为 1.5m 精密作业型(6 个自由度)

1. 钢丝绳吊挂式舱内机器人

Charlotte 是为微重力实验而开发的独特的舱内机器人。由图 4.37 可知,相当于机器人本体的方箱顶部有 8 处悬吊了钢丝绳,电机缠卷钢丝绳使方箱前后移动和旋转。方箱的正面有摄像机、照明灯、夹持器,代替航天员做按下实验台开关或转动旋钮的动作。

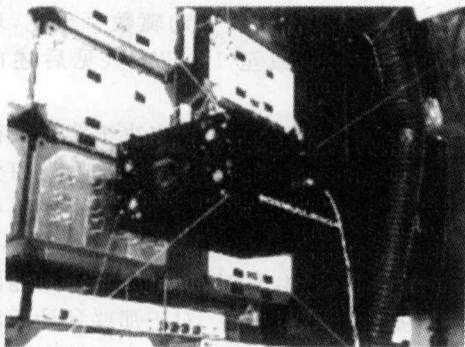


图 4.37 在 Spacehab 工作的钢丝绳吊挂式舱内机器人 Charlotte(Boeing)

2. ETS-VII 的轨道服务实验

在 1998 年以后的两年时间内,日本技术试验卫星 VII 进行了世界上早期的无人太空飞船内的机器人实验。实验的遥控机器人是试验飞船上搭载的 2m 长的机械臂(ERA: ETS-VII Robot Arm),此外还有一个装备 3 指多重传感器手部的小型机器人(ARH: Advanced Robotic Hand system)。试验的内容是基于传感器融合来遥控机器人,实现零件级的精

密作业、作业环境测量的遥感实验等。图 4.38 为带有 ARH 手部的 ERA 正在回收试件的作业情景。

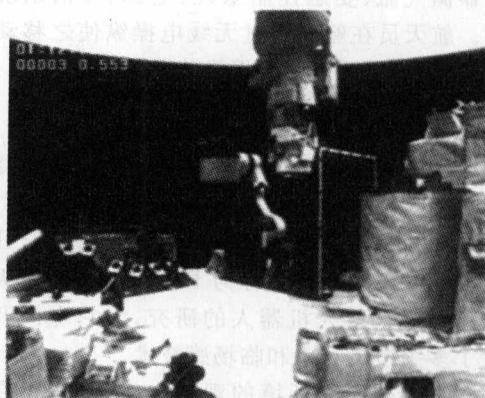


图 4.38 ETS-VII 的轨道服务实验
(上方为地球)(NASDA)

3. 太空站机械手

加拿大为建立太空站开发了一个实用化的机械臂 SSRMS,它长达 18m^[8]。该机械臂是一个以肘关节为中心对称的 7 自由度手臂,两端的末端执行器可以抓持构造物上的定位器,像尺蠖那样步行。欧洲也开发了相同类型的机械臂(ERA: European Robotic Arm),计划用于俄罗斯太空舱。SSRMS 最终的构建方案是扩展成移动服务系统(MSC: Mobile Servicing Center),如图 4.39 所示,双机械臂安装在轨道移动台上,可沿基础滑动。

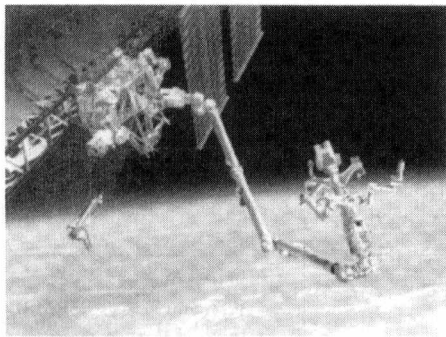


图 4.39 太空站建设用机器人 MSC(MD Robotics)

4. 飞行型摄像机

为了太空站的外观检查,人们在航天飞机上开展了具有飞行功能的摄像机器人 AERCam(Autonomous EVA Robotic Camera)的实验。在足球大小的球体中安装了两台 CCD 摄像头和照明灯,此外还配备有气体推进器储气瓶、姿态控制系统、电源、通信系统等。航天员在舱内通过无线电操纵使之移动到摄像位置,图像则经无线装置传回舱内。

5. 研究开发实例

NASA 正在进行被称为 Ranger^[8] 的 4 臂(两个 8 自由度作业臂、1 个 6 自由度固定臂、1 个 7 自由度摄像臂)舱外机器人的研究开发。此外还在进行被称为 Robonaut^[8] 的航天员型拟人太空人机器人的研究,为它专门开发了多关节灵巧手和临场感技术。

从保护太空环境的观点出发,日本正在如火如荼地开展用于故障卫星救援的轨道机器人的研究^[9],为此还专门出版了轨道机器人的研究特辑^[10,11]。

4.4.3 行星机器人

对行星探索机器人^[12,13],以及用于未来月球和火星等行星基地建设、维护、资源开采等的机器人都有一定需求。行星机器人与轨道机器人最大的区别在于前者受重力场的作用,以自然环境为对象。虽然行星机器人近似于地球环境的移动机器人,但它面临多方面的不利因素,例如,高温环境、对环境了解很少、无法得到人的物理支援、能源供应受限、严格的质量限制等,因此开发的难度极大。

行星机器人的主要课题包括:①不平整地面的移动性能(mobility);②自主性能;③减小体积和减轻质量的问题;④试样采集和分析功能;⑤能源供应。

影响不平整地面移动性能的关键在于移动机构,现在已经研发出轮式、履带式、腿足式,以及独特的气球等多种方式。阿拉斯加火山口探索机器人 Dante-II(NASA/CMU)是 8 足机器人的代表实例。如果避开山崖地形不谈,那么应该说轮式具有优越的移动性能。自 1970 年的无人月球探线车 Lunokhod 以后,轮式行星探索机器人取得了骄人的成绩。为适合在沙地、岩石地带等环境下移动,需要在悬挂和车轮方面下大工夫。

地球与行星之间的通信受到延时和容量的极大制约,因此自主移动对行星机器人显得十分重要。人们围绕这个主题开展了路径规划、位置估计、视觉、障碍物回避、学习机能等多方面的研究。

体积小、质量轻既是受到火箭运载的限制,也是为了满足低成本的要求,随着 MEMS(Micro Electro-Mechanical System)的发展,机器人在微型化和纳米化方面取得了显著的进展。过去机器人的质量动辄数百千克,现代科技能够将其减至 1kg 以下(见后述内容)。

探索任务能否成功最终取决于能否获得新的发现。因此,机器人化的试样收集和分析装置起到关键的作用,探索任务需要超小型、低电耗、耐振动、耐温度变化的科学仪器。

要完成长距离、长时间的探索任务,能源是一个极其重要的保证。对于那些预计无法正常获得太阳能的行星,小型高容量电池或 RTG(Radioisotope Thermoelectric Generator),以及电源高效管理技术是不可或缺的。

4.4.4 行星机器人的实例

以手臂形式呈现的行星探索机器人可以举出在阿波罗计划(分别于 1967 年、1968 年)实施月球着陆时现身的 NASA 无人探索机器人 Surveyor3 号、7 号。它们搭载了 Soil Mechanic Sampler 机械臂。1976 年,在火星上着陆的无人探索行星机器人 Viking1 号、2 号上也搭载了机械臂,用于土壤取样(生命调查)。下面介绍几个具有代表意义的行星机器人。

1. Sojourner

NASA 的 Mars Pathfinder 搭载的 Micro-Rover Sojourner 于 1997 年 7 月在火星上着陆,成功完成了对着陆点附近土壤的勘察。该机器人的结构十分紧凑,外形尺寸为 $63\text{cm} \times 48\text{cm} \times 28\text{cm}$,质量 11kg ,是采用浮动转向悬挂系统的独立 6 轮驱动车,可以跨越与车轮直径(13cm)相当的障碍物。考虑在高温沙地上行走的要求,车轮采用钢丝网状结构,前后轮分别有转向电机。在总共 10 台电机的驱动下,机器人的最高行进速度达到 0.4m/min 。它的行走靠机载计算机(80C85)进行自主控制,基于陀螺仪和轮式测距仪按照航位推测法定位,并定期地依据登陆舱的图像作原点校正。需要回避障碍时靠激光/摄像头式多点接近距离传感器和接触传感器实施动作控制。

在它上面搭载的科学仪器有 α 射线/质子射线/X 射线分光计,可以进行火星物质的化学成分分析。电源包括 Micro-Rover 上方的 GaAs 太阳能电池(16W)和普通电池($150\text{W} \cdot \text{h}$),可提供 30W 的峰值功率。由于夜间火星的气温降至 -110°C ,故不耐低温的元件被封装在 WEB(Warm Electronics Box, 电子恒温箱)中,靠 3 只 1W 的 RHU(Radioisotope Heating Unit, 放射性同位素加热装置)保持 WEB 内部 $-40 \sim +40^\circ\text{C}$ 的温度环境。

2. Mars Exploration Rovers

Sojourner 的探险范围为半径 10m ,名义使用寿命 7 天。NASA 于 2003 年 6 月和 7 月分别发射了 Spirit 和 Opportunity 的两台火星探索 Rover,2004 年 1 月间它们分别成功着陆。两台机器人的外形相似,有如图 4.40 所示的 6 轮浮动转向悬挂系统结构,全长为 1.6m 、质量为 174kg 、最大速度为 5cm/s 、工作时间按 90 天设计^[14]。前面提及的 Sojourner 与地球通信必须通过登陆舱中继,而这两台机器人则可以直接与地球通信。

它们探索火星的具体任务是进行表面岩土分析,直至证实火星上是否曾经一度有过水分充足,供生物生存的时代。结果它们成功地发现了这些证据。它们的升降立柱上搭

载全景摄像机、小型热辐射分光计,机器人的手臂上搭载了穆斯堡尔(Mössbauer)分光计、 α 射线/X 射线分光计、显微镜、岩石磨削工具等,以实施矿物表面形状和结构的现场观测。计算机则采用耐放射线的 PowerPC 芯片。

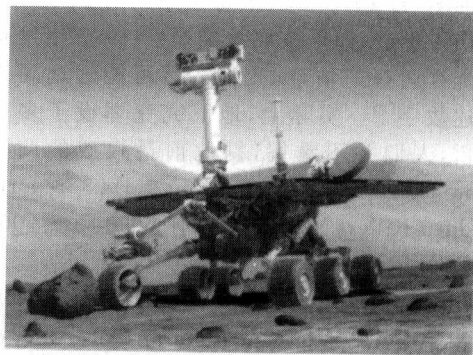


图 4.40 火星机器人 Spirit 的活动概念图
(NASA,JPL)

3. Nano-rover

在 Sojourner 的基础上,JPL 又开发了更小型的 Nano-rover。它的长度为 20cm 、质量为 0.8kg ,独立 4 轮驱动,在 2 连杆臂的两端安装车轮,即使翻倒也可以借助臂部的动作复原,十分耐用。按照国际协作计划,曾一度有过搭载日本小行星探索机器人 MUSES-C 的立项,后来因为预算的问题被迫中止。

4. MINERVA

小行星的重力在毫 G 以下,如果采用轮式结构,很可能无法获得足够的接触压力和摩擦力而陷入举步维艰的境地。2003 年 5 月,日本宇宙科学研究所(现改名为宇宙航空研究开发机构)发射的 MUSES-C(隼鸟)搭载的 MINERVA(Micro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid)^[13]是一台利用微重力现象的、独特的、跳跃式移动的自主探索机器人。它的重量为 0.6kg 、直径为 12cm 、高为 10cm ,具有正 16 角柱状结构,安装了两台扭矩计、3 台摄像机、6 个温度传感器。扭矩计的旋转反力产生跳跃,在空中又靠扭矩计控制姿态,实现移动。其任务是对小行星表面进行摄像,了解表面的三维构造,测量其温度等。

町田和雄

4.5 探雷/排雷机器人

4.5.1 人道目的和排雷

虽然目前尚无法确切地掌握地雷造成的死伤人数,但根据国际红十字委员会(ICRC)的推测,自1995年以来每年平均有2.4万人死伤。不过,如果按照该委员会1997年发布的统计调查来估计,死伤人数可能远远高于上述数字^[1]。实际上,地下究竟埋设了多少地雷,人们并不掌握,据此前最权威的调查“the U. S. State Department's 1998 report, Hidden Killers”披露,大约有6000万~7000万枚地雷^[2]。

禁止使用反步兵雷的国际活动始于1991年由VVAF(Vietnam Veterans of America Foundation,美国越战退伍军人基金会)和Medico International(德国)两个NGO组织为中心发起的“International Campaign to Ban Landmine”(ICBL,国际禁设地雷运动)。1995年,联合国主持召开了有关撤除地雷的国际会议,1996年,联合国总部通过了“禁止使用、储存、生产、进出口反步兵雷的全面国际条约”。日本是该条约的86个提案国之一,于1997年签署了1999年3月1日生效的“禁止反步兵雷条约(渥太华条约)”。1998年,“禁止制造和持有反步兵雷法律”生效。

日本一直向柬埔寨、阿富汗等多个国家提供探雷/排雷的支援,在相关省厅的协助下开展的研究中,探雷/排雷技术属于其中的一个环节。不过,输出排雷设备是与日本武器输出三原则相抵触的,因此日本在1997年发布“反步兵雷排除装置属于人道主义的、为排除反步兵雷所必需的,因此在一定条件下并不违反武器输出三原则”(官房长官谈话)的谈话,此后开始允许基于人道主义的、排除反步兵雷的设备出口。

4.5.2 地雷和排雷技术

所谓地雷是指埋设在土地或其他物体表面(或地下,或其他物体之下)及其周边的、被设计成一旦人或车辆接近或接触即刻发生爆炸的爆炸物。它大致可以分为反步兵雷(APM: Anti-Personnel Mine)和反坦克雷(ATM: Anti-Tank Mine)两大类。然而,去除

APM的排雷人员搭乘的车辆遭遇ATM,造成全员死亡的事故时有发生。可见,不管是APM还是ATM,对人的危害是相同的。有时地雷埋设点还残留“哑雷”(UXO: unexploded ordnance),探雷排雷的对象涵盖所有这些爆炸物,甚至包括探雷的障碍物——金属片。

据说地雷的种类超过600种,大致可以分为冲击式(blasting mines,在埋设状态下爆炸)、弹片式(fragmenting mines,爆炸后破碎成弹片危害人体)、跳跃式(bounding mines,可以视为弹片式的一种,一旦引爆即弹出地面在空中爆裂成弹片)。

按引爆方式大致可以分为在外力作用下起爆的接触式,利用红外线、电磁波、激光、磁性、声音等传感器检测接近物体后起爆的感应式两大类。接触式又可以分为压力式(检测地雷加重状态)、拉伸式(检测套索引线的张力)、倾斜式(排雷作业时发现地雷被倾斜)等。

制造地雷所用的材料多种多样,有的含金属成分较多,有的几乎全是塑料,只含极少量的金属。炸药也不尽相同。地雷埋设的深度、土壤、地形也形形色色,有的地雷受降雨之类自然现象的影响会改变位置,有时在埋设场所同时隐藏炮弹弹片之类的金属片,干扰探雷作业^[3]。

处理地雷的步骤如下^[4]:

① 广域探测作业,确定地雷埋设区域(根据战斗记录、受害调查、碾压车辆等行走进行探测)[Level 1: General Survey]。

② 去除植被作业(有时用重型机械)。

③ 探雷作业(靠人工探针作业、金属探测器、地雷犬等)[Level 2: Technical Survey]。

④ 排雷作业(手工排雷,重型机械粉碎处理等)。

⑤ 排雷确认作业(与第③项内容相同)[Level 3: Completion Survey]。

广域探测作业除利用人造卫星、飞机遥感遥测外,还可以用小型无人直升机^[5]和飞艇携带传感器进行探测。

探测地雷的方法多采用电磁感应法(金属探测器)。虽然日本也有企业开发探测器,不过澳大利亚的Mine Lab.公司和奥地利的Shiebel公司生产的设备事实上已经成为世界标准。如果反步兵雷是由非金属材料制成的,尽管经过了长年的研究,目前尚未确立一

种有效的探测方法。为此,目前人们正在尝试传感器融合探雷研究,即将区别地雷和土壤物性值的检测技术和金属探测器结合起来,涉及电磁波法(地下雷达)、电气探测法(对比阻抗法)、热探测法(红外线传感器)、超声波法等。关注火药本身物性值的研究正在实施中,涉及如化学传感器、生物传感器等。

探雷/排雷作业有成对作业方式(如在柬埔寨,由一名探雷专家和一名排雷专家组成实施),或者连续作业方式(如在阿富汗,由一名专家同时担当探雷和排雷作业)。排雷用探针(pick prod, prodder)、小铲(mini spade)、deminig brush等工具,有时地面对金属探测器有反应,似乎地下埋设了地雷,为了安全起见,可以一面用探针探测,一面把土刨开,露出埋设物后用双眼进行观察。一旦地雷的侧面暴露出来,就针对该位置做好标记,在当天排雷工作结束前统一实施爆破。据称,这种手工探雷/排雷作业,每排除 5000 个地雷就会有 1 个人牺牲。

探雷/排雷作业的改善可以分为三步进行:机械化排雷作业、探雷作业机器人、自动探雷/排雷作业。

排雷机械大多从建筑机械或农业机械改造而来。有关国际上地雷处理机械和装备的实用化和开发状况可以参考“Journal of Mine Action”和 Humanitarian Demining R&D Program 等文献[6~9]。日本开发的实用化方法是使用耐爆硬质合金高速旋转切断器(安装在液压挖掘机的前端)挖掘地面,触发地雷引信引起爆炸。此外,旋转式切断机(日立建机,山梨日立建机)也已经实用化了,它负责采伐那些排雷场地周边的树木。另外,日本还开发了一种压路机型排雷设备(小松),利用旋转滚筒将地面掘起。还有一种排雷设备(川崎重工)可以回收地雷碎片,是由除雪机改造成的。

验证/评价排雷技术的标准应该依据联合国地雷行动机构 UNMAS(United Nations Mine Action Service)和 GICHD(Geneva International Center for Humanitarian Deming,日内瓦国际人道主义扫雷国际中心)双方商定的 IMAS(International Mine Action Standard,国际排雷行动标准),如需要请留意相应的内容。

4.5.3 探雷机器人

1. 概述

探雷机器人应该具有两个部分的功能:一部分是操作传感器;另一部分是机器人自身的移动。它们都建立在遥控的基础之上。如果将面向探雷任务的部分去掉,那么它就与普通的移动机器人相差无几了。

探雷机器人的传感器叫做金属探测器,大多安装在机械臂的前端。不过正在研究中的探雷机器人 Probot 靠机械臂采用特殊的探测器来探测地雷^[10]。探雷机器人的末端执行器除了传感器外,还包括气枪(标明地雷位置)和割草机等工具。它的移动机构应该能够适应不平整地面,目前研究的移动形式包括轮式、履带式、腿足式等,机器人移动研究的另一项内容是在布雷区内的路径规划问题^[11]。

2. 实例

CCMAT(Canadian Centre for Mine Action Technologies)是 1998 年成立的以人道主义的探雷/排雷技术开发为目的的加拿大国立机构。

图 4.41 给出 CCMAT 研发的 ARS(Articulated Robotic Scanner)机器人,这是一台有 6 个独立转向轮的遥控机器人,上面搭载了 4 自由度机械手,探测范围达 $2\text{m} \times 0.5\text{m}$ 。ARS 借助于激光测距器和超声波传感器组合实现地面凹凸的检测,能携带最大至 5kg 的地雷探测器贴在地表附近扫描^[12]探雷。



图 4.41 ARS 机器人(CCMAT)

RMA(Royal Military Academy, (英国) 皇军陆军军官学校)负责协调比利时的 HUDEM (HUMANITARIAN DEMINING) 计划,它也在从事多种机器人的研究^[13,14]。

图 4.42 所示的探雷机器人是从爆炸物处理履带车改装成的,搭载有 3 自由度的直

角坐标探雷系统。

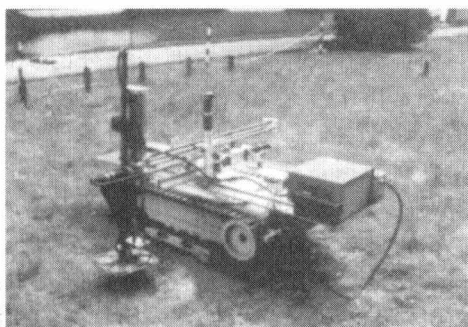


图 4.42 地雷探测车辆(RMA)

图 4.43 中的 TRIDEM 则是一个搭载了多种探雷传感器的小型自主机器人,其任务是沿雷区边界四周进行移动探测,减少地雷处理人员的危险。

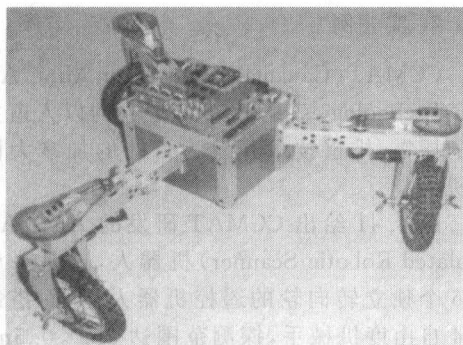


图 4.43 TRIDEM 机器人(RMA)

图 4.44 中的 AMRU1 是 1998 年从大型飞机机翼超声波探伤仪的机械平台改装而成的,上面搭载了一套 2 自由度的直线移动扫描机。

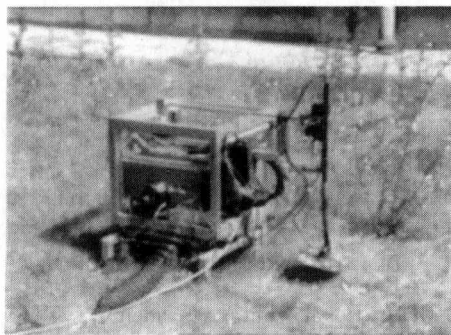


图 4.44 AMRU1 机器人(RMA)

图 4.45 为 1992 年开发的 AMRU2,它有 6 条 3 自由度腿,搭载 2 自由度摄像云台和探雷手臂,利用传感器可以实现避障。

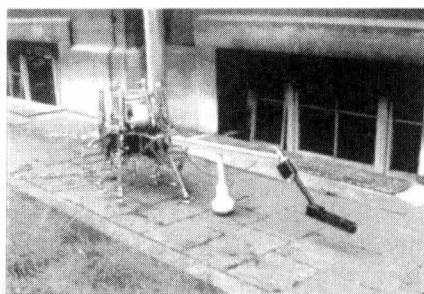


图 4.45 AMRU2 机器人(RMA)

图 4.46 为 1994 年制作的电液式 6 足移动机器人 AMRU3,它的总质量为 200kg,跨越障碍物的 height 为 20cm,能在小于 30° 的斜面上移动。

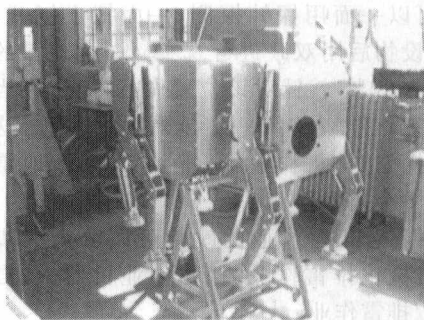


图 4.46 AMRU3 机器人(RMA)

图 4.47 为西班牙的 IAI-CSIC(Industrial Automation Institute-Council for Scientific Research, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas)于 1995 年前后开发的搭载金属探测器的 4 足探雷机器人^[15]。

野波等开发的探雷机器人 COMET-I 如图 4.48 所示。其设计的思路是探雷机器人在雷区对地雷做好标记,排雷时,如果遇到反坦克雷,随行的地雷处理车就主动回避,如果遇到反步兵雷,则采取迅速踩踏的爆破处理方式^[16,17]。

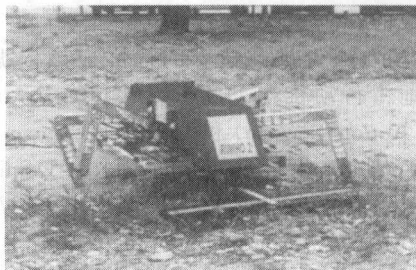


图 4.47 RIMHO2 机器人(IAI-CSIC)

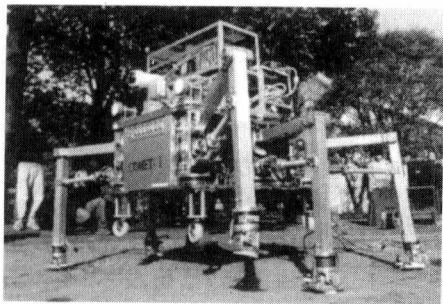


图 4.48 COMET-I 机器人(千叶大学)

从不平整地面步行的安全性来看,6条腿的结构对避开地雷埋设点保持姿势稳定比较有利。COMET-I 机器人的各条腿有3个自由度,采用平行连杆机构,足端安装超小型金属探测器,只有在确认落脚点附近安全之后才将脚着地,这样就可以通过雷区了。如果位于机器人腹部的地下探测雷达发现了反坦克雷,则利用GPS予以定位。机器人搭载的超声波传感器用来识别障碍物,位于机器人前部的CCD摄像机用来识别环境,另外它还搭载数据通信用的无线电收发设备。该机器人总质量为120kg,外形尺寸为宽1.2m、长1m、高1m,可以实现半自主步行。

如上所述,COMET-I在着地前需要停下来确认安全,因此它移动比较缓慢,探雷效率比较低,所以后来又改进成能够在行进中探雷的COMET-II^[18,19],如图4.49所示。

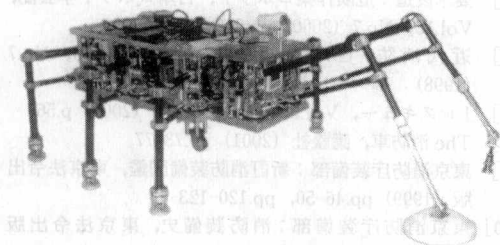


图 4.49 COMET-II 机器人(千叶大学)

COMET-II配备有两只机械手,一只机械手的末端同时安装了金属探测器(ECT)和地下雷达(GPR),形成复合传感器,探测深度可达1m。另一只机械手安装了喷枪,负责喷涂彩色标记。安装传感器的那只机械手快速地向左右移动,探测反步兵雷、反坦克雷、哑雷等,一旦发现其中的任何一种,立即用彩色喷枪打上标记,同时读取GPS定位(精度为

2cm)。机器人把雷区分成安全位置和危险位置,机器人的足端只允许落在安全位置内。

在排雷时让无人地雷处理车紧跟探雷机器人行进,根据机器人指示的信息避开反坦克雷和哑雷,它只专注挖掘和回收反步兵雷。

上面提及的复合传感器对各种地雷的响应如图4.50所示。由图4.50可知,GPR对塑料制反步兵雷的反应比ECT强。机械手高速运动时,由于惯性力和刚度的影响会造成复合传感器端部较大的位置误差,导致地雷埋设地点的指示偏差。因此,搭载传感器的机械手既应该让探雷传感器与地面之间保持一定距离,又应该通过控制措施,减少高速动作时的位置误差。

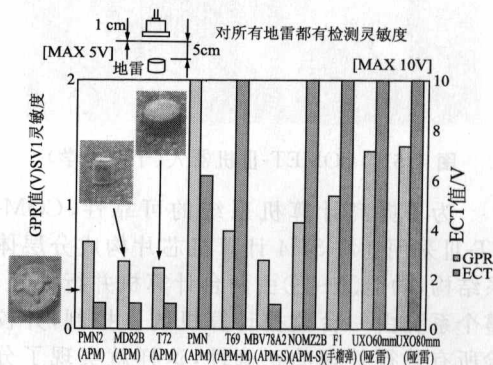


图 4.50 ECT 和 GPR 对各种地雷的响应值

安装喷枪的那只机械手还可以安装割草机,一面割草一面探雷。

除上述传感器外,机器人还装有CCD摄像机、红外线摄像机、激光测距仪、力传感器、无线通信设备等。激光测距仪用于检测障碍物和套索地雷的引线,以利于做出回避动作。

COMET-II的探雷宽度约为2m,步行速度为150m/h,换算成探雷速度就是300m²/h。为了减轻质量,机器人的腿部和手臂采用CFRP材料,总质量达到120kg、全长为2m、全宽为1.2m、高为0.6m。

COMET-III(图4.51)是在COMET-II的成果上改进开发的自主探雷机器人,目的在于提高可靠性、耐久性,提供室外试验^[19~21]。该机器人有两只手臂,可以在室外连续进行实施约8h的作业。它的主要功能如下:

- ① 基于复合传感器实施探雷作业。
- ② 基于传感器(立体图像)回避壕沟和障碍物。

- ③ GPS 定位。
- ④ 用彩色标记完成地雷埋设位置的分类。
- ⑤ 基于 GPS 实现轨迹跟踪控制。
- ⑥ 基于阻抗控制实现地雷回避。
- ⑦ 不平整地面的位置和力混合控制。
- ⑧ 监控和多任务协调控制。
- ⑨ 腿、履带的可重构自主控制。

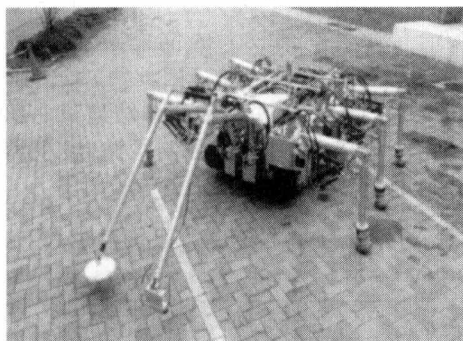


图 4.51 COMET-III 机器人(千叶大学)

为了提高计算机系统的可靠性,COMET-III 采用 3 块 SH4 计算机芯片构成分层体系结构,功能①~⑨由两台计算机并行处理,整个系统由一台监控计算机统一控制,并校验所有并行处理的正确性,这样就实现了分级监控和多任务协调控制的思想。

COMET-III 的移动机构靠液压驱动履带和 6 足并用,履带移动的速度为 4km/h,步行时移动速度为 300m/h。探雷速度达到 1500m²/h,是 COMET-II 的 5 倍。它的总质量约为 1000kg,外形尺寸为长 4m、宽 1.8m、高 1m。

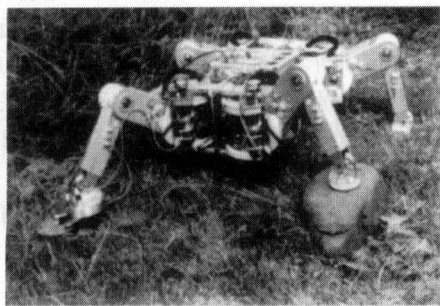


图 4.52 安装力反馈脚爪的 TITAN-III 机器人
(东京工业大学)

机器人在探雷、挖掘、排开石头等障碍物时,需要将末端执行器的感觉传回实施遥

控的排雷人员手中。图 4.52 为加藤等开发的 TITAN-III 机器人,其特点在于足端安装了脚爪,可以将脚指关节的变形量转换成力觉反馈给操纵员^[21,22],脚爪类似于人手的拇指与食指的第二个关节,很容易将力觉回传给操纵员。

2001 年秋,日本科学技术振兴机构(JST)启动“基于人道的探雷/排雷技术研究开发”计划。该计划面向阿富汗的探雷排雷支援项目,在机器人技术的驱动下,探雷/排雷机器人的研究不断得到发展^[23]。

野波健藏

参考文献

- 4.1 灾害应对机器人
- [1] Hisanori Amano: Rescue Companies and Equipment of Fire Defense Organization in Japan, Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (2001)
- [2] Hisanori Amano: Fire Department and Fire Fighting Robot, ロボット工学セミナー防災ロボットの現状と課題, 日本ロボット学会 (2001) pp.21-28
- [3] Hisanori Amano, Koichi Osuka and Satoshi Tado-koro: Fire Fighting and Rescue Robot in Japan, International Conference of Institution of Fire Engineers (2001)
- [4] 田所諭, 大須賀公一, 天野久徳: レスキューロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6 (2001) pp.685-688
- [5] 妻木俊道: 危険作業ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7 (2000) pp.946-950
- [6] 近代消防, 日本の消防'48~'98, Vol.36, No.7 (1998)
- [7] J レスキュー, Vol.3, イカロス出版 (2001) p.56
- [8] The 消防車, 講談社 (2001) pp.73-77
- [9] 東京消防庁装備部: 新訂消防装備図鑑, 東京法令出版 (1999) pp.46-50, pp.120-123
- [10] 東京消防庁装備部: 消防装備史, 東京法令出版 (1998) pp.122-127
- [11] 近代消防, Vol.34, No.8 (1996) p.14
- [12] 大阪市消防局施設課: 平成 12 年度新車紹介, 大阪消防, Vol.53, No.7 (2001) pp.40-42
- [13] 近代消防, Vol.32, No.7 (1994) p.16
- [14] 菅野道夫: 実用化を目指す空中ロボット—無人ヘリコプター—, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7 (2000) pp.937-940
- [15] 中村心哉, 佐藤彰, 柴田英貴, 菅野道夫: 画像処理および GPS を用いた無人ヘリコプターによる自動探索追従システムに関する研究, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6 (2000) pp.862-872
- [16] Hisanori Amano, Tzhy-Jong Tarn and Koichi Osuka: Development of Vertically Moving Robot

- with Gripping Handrails for Fire Fighting — Numerical Simulation Study —, Proceedings of the 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference (2000)
- [17] Hisanori Amano, Koichi Osuka and Tzhy-Jong Tarn : Experimental Study of Vertically Moving Robot with Gripping Handrails for Fire Fighting, Proceedings of the Fifth International Conference on Motion and Vibration Control (2000) pp.293-298
- [18] Hisanori Amano, Koichi Osuka and Tzhy-Jong Tarn : Development of Vertically Moving Robot with Gripping Handrails for Fire Fighting, Proceedings of International Conference on Intelligent robots and Systems (2001) pp.661-667
- [19] 日本赤十字社監訳：世界災害報告，京都大学防災研究所付属巨大災害研究センター（2000）
- [20] J. Casper : Human-Robot Interactions during the Robot-Assisted Urban Search and Rescue Response at the World Trade Center, MS Thesis, Computer Science and Engineering, University of South Florida (2002)
- [21] R. Murphy, J. Blitch and J. Casper : AAAI/RoboCup-2001 urban search and rescue events : reality and competition, AI Magazine, Vol.23, No.1 (2002) pp.37-42
- [22] S. Tadokoro, T. Takamori, S. Tsurutani and K. Osuka : On robotic rescue facilities for disastrous earthquakes—from the Great Hanshin-Awaji (Kobe) Earthquake —, J. Robotics and Mechatronics, Vol.9, No.1 (1997) pp.46-56
- [23] 高森，田所，鶴谷，大須賀ほか：レスキューロボット機器研究会報告書，日本機械学会ロボメカ部門 (1997)
- [24] 廣井：地球，No.13 (1995)
- [25] I. Erkmen, A. M. Erkmen, F. Matsuno, R. Chatterjee and T. Kamegawa : Serpentine search robots in rescue operation, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol.9, No.2 (2002)
- [26] M. Mori and S. Hirose : Development of Active Cord Mechanism ACM-R 3 with Agile 3 D mobility, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (2001) pp.1552-1557
- [27] H. Tsukagoshi, A. Kitagawa and M. Segawa : Active Hose : An Artificial Elephant's Nose with Maneuverability for Rescue Operation, Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (2001) pp.2454-2459
- [28] T. Takayama and S. Hirose : Development of "Souryu-I & II", Proc. TITech COE/Super Mechano-Systems Symposium (2001) pp.HRS-1
- [29] H. Kimura, K. Nakaya and S. Hirose : Development of "Genbu" : Articulated Multi-Wheeled Mobile Robot, Proc. TITech COE/Super Mechano-Systems Symposium (2001) pp.HRS-11
- [30] R. Chatterjee and F. Matsuno : Use of single side reflex for autonomous navigation of mobile robots in unknown environments, Robotics and Autonomous Systems, Vol.35, No.2 (2002) pp.77-96
- [31] Y. Takahashi, T. Arai, Y. Mae, K. Inoue and N. Koyachi : Development of Multi-Limb Robot with Omnidirectional Manipulability and Mobility, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (2000) pp.2012-2017
- [32] E. F. Fukushima, N. Kitamura and S. Hirose : Development of tethered autonomous mobile robot systems for field works, Advanced Robotics, Vol.15, No.4 (2001) pp.481-496
- [33] D. Kurabayshi and H. Asama : Knowledge Sharing and Cooperation of Autonomous Robots by Intelligent Data Carrier System, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (2000) pp.464-469
- [34] K. Osuka et al. : Rescue Robot Contest in RoboFesta-KANSAI 2001, Proc. IECON (2000) pp.132-137
- [35] <http://www.rescue-robot-contest.org/>
- [36] H. Kitano and S. Tadokoro : RoboCup-Rescue : A grand challenge for multi-agent and intelligent systems, AI Magazine, Vol.22, No.1 (2001) pp.39-52
- [37] A. Shultz : The 2000 AAAI mobile robot competition and exhibition, AI Magazine, Vol.22, No.1 (2001) pp.67-72
- [38] A. Jacoff, E. Messina and J. Evans : A Standard Test Course for Urban Search and Rescue Robots, Proc. Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop (2000)
- [39] <http://www.r.cs.kobe-u.ac.jp/robocup-rescue/>
- [40] 田所，北野編：ロボカップレスキュー—緊急大規模災害救助への挑戦，共立出版 (2000)
- [41] 田所，高橋ほか：ロボカップレスキュー：情報科学の緊急災害対応問題への挑戦，情報処理，Vol.41, No.5 (2000)
- [42] 田所，高橋ほか：ロボカップレスキュープロジェクト，人工知能学会誌，Vol.15, No.5 (2000)
- #### 4.2 极限环境作业机器人
- [1] 极限作业ロボットプロジェクト，JRSJ, Vol.9, No.5 (1991)
- [2] 山本欣市，柿倉正義：極限作業ロボット，工業調査会 (1992)
- [3] 原子力用ロボット，原子力百科事典 ATOMICA, <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/>
- [4] 宮沢竜雄ほか：原子力におけるロボット開発，原子力工業，Vol.34, No.4 (1986) pp.7-33
- [5] 妹尾ほか：原子力発電プラント用移動式小型監視点検装置の開発と実機への適用，火力原子力発電，Vol. 483 (1996) pp.47-53
- [6] 中山ほか，原子力点検ロボットに用いる半月形クローラ車の開発，JRSJ, Vol.2, No.3 (1984) pp.238-243
- [7] 水野ほか：遠隔点検保守用走行マニピュレータの開発，第2回知能移動ロボットシンポジウム (1984) pp.67-72
- [8] 大道武生ほか：高機能移動式軽作業ロボットの開発，火力原子力発電，Vol.37, No.9 (1986) pp.49-60
- [9] 佐藤ほか：システム保全ロボット「AMOITY」の開発，日本機械学会講演論文集，No.860-1 (1986) pp.37-40

- [10] 岩本ほか：形状可変クローラ走行車 (Mk-2) の開発, 第 2 回 RSJ 学術講演会 (1984) pp.229-230
- [11] 蒸気発生器伝熱管用超高速全自動 ECT システム, 三菱重工技報, Vol.37, No.3 (2000)
- [12] 大道武生ほか：改良標準型原子炉格納容器超音波探傷装置の開発, JRSJ, Vol.12, No.3 (1994) pp.357-358
- [13] 木村元比古ほか：原子炉用水中目視点検装置の開発, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.10 (1996) pp.826-833
- [14] 佐藤勝彦ほか：原子力発電所における水中作業ロボットの開発, ロボット・メカトロニクス講演会予稿集, C 203 (1995)
- [15] 内藤：磁気クローラ式吸着移動ロボット, JRSJ Vol.10, No.5 (1992) pp.606-608
- [16] 原子炉ブル除染用小型壁面除染ロボット, www.atox.co.jp
- [17] 放射性汚染除去水底ロボット, <http://www.fhi.co.jp/news/99-10-12/10-13-a.htm>
- [18] 核融合炉のメンテナンス用ロボットの開発が急ピッチで進む, FF, No.27 (1996)
- [19] ITER 用遠隔保守装置 (ロボット) 開発に挑む, 原研ニュース, No.22 (2001)
- [20] Whittaker et al.: Conception and Development of Two Mobile Teleoperated Systems for TMI-2, Proc. of International Meeting and Topical Meeting TMI-2 Accident, American Nuclear Society (1988)
- [21] Project Pioneer, <http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/pioneer/>
- [22] 濱田彰一ほか：欧米における原子力防災ロボットの調査報告, JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.2-8
- [23] 小林忠義ほか：原研における事故対応ロボットの開発 (その 1), JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.30-33
- [24] 柴沼清：原研における事故対応ロボットの開発 (その 2), JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.34-37
- [25] 間野隆久ほか：原子力防災支援システムの開発, JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.38-45
- [26] ロボットによる遠隔解体技術, 原子力百科事典 ATOMICA, <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/>
- [27] 宮坂靖彦ほか：JPDR 解体実地試験の概要と成果, 原子力学会誌, Vol.38, No.7 (1996) p.553-576
- [28] 石川迪夫：原子炉解体—安全な退役のために, 講談社 (1993)
- [29] 東海発電所の廃止措置, <http://www.japc.co.jp/haishi/>
- 4.3 海洋机器人 (水下机器人)
- [1] 浦環ほか：海中ロボット総覧, 成山堂書店 (1994)
- [2] 浦環ほか：海中ロボット, 成山堂書店 (1997)
- [3] 浦環：自律型海中ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7 (2000) pp.933-936
- [4] D. Yoerger et al.: 自律海底探査機エイブ (ABE: Autonomous Benthic Explorer) を用いた海底溶岩流の調査, 海洋調査技術学会誌, Vol.9, No.1 (1997) pp.43-60
- [5] 浦環ほか：航行型海中ロボット「アールワン・ロボット」による手石海丘観測, 海洋調査技術, Vol.13, No.1 (2001) pp.11-25
- [6] 浦環：自律型海中ロボット r2D4 の製作と佐渡沖および黒島海丘海底観測, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6 (2004.9) pp.709-713
- [7] 藤井輝夫ほか：Development of a Versatile Test-Bed “Twin-Burger” toward Realization of Intelligent Behaviors of Autonomous Underwater Vehicles, Proc. OCEANS’93, Vol.1 (1993) pp.186-192
- [8] 近藤逸人ほか：Development of an autonomous underwater vehicle “Tri-Dog” toward practical use in shallow water, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.13, No.2 (2001) pp.205-211
- 4.4 空間机器人
- [1] 町田：宇宙環境とロボット機器, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.1 (1989) pp.87-92
- [2] 中村：非ホロノミックロボットシステム, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2 (1994) pp.231-239
- [3] 梅谷, 吉田：一般化ヤコビ行列を用いた宇宙ロボットマニピュレータの分解速度制御, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4 (1989) pp.327-337
- [4] Special Issue on Robotics in Space, The J. of Astronautical Sciences, Vol.38, No.4 (1990)
- [5] 町田：宇宙ロボティクスとシミュレータ, シミュレーション, Vol.16, No.2 (1997) pp.103-110
- [6] T. B. Sheridan: Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, MIT Press (1992) pp.1-364
- [7] 特集「ETS-VII における宇宙ロボット実験」, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8 (1999) pp.1053-1104
- [8] Proceedings of i-SAIRAS2001, CD-ROM版 (2001)
- [9] 町田：宇宙ロボットによるレスキューと保全, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.6 (2001) pp.701-705
- [10] Special Issue on Space Robotics, IEEE Robotics and Automation, Vol.9, No.5 (1993) pp.521-704
- [11] S. B. Skarr and C. F. Ruoff: Teleoperation and robotics in space, AIAA, Progress of Astro. & Aero. Vol.161 (1994) pp.3-489
- [12] 久保田：月・惑星環境における探査ロボットの設計, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.5 (1999) pp.609-614
- [13] 特集「月・惑星探査ローバ」, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5 (2003) pp.462-506
- [14] NASA: Mars Exploration Rover Launches, Press Kit (June 2003)
- 4.5 探雷/排雷机器人
- [1] ICRC, Landmines must be Stopped: Overview 1999, ICRC Publication (1999)
- [2] U. S. Department of State, Hidden Killers: the Global Demining Crisis, Washington D. C. U. S. Department of State Publication (1998)
- [3] Humanitarian Demining, <http://www.humanitarian-demining.org/demining/default.asp>
- [4] 対人地雷の探知・除去技術に関する研究会：対人地雷の探知・除去技術に関する研究開発の進め方について (2002), <http://www.mext.go.jp/a-menu/kagaku/jirai/020502.html>
- [5] T. R. Gendon: Mechanically assisted landmine clearance and detection, Journal of Mine Action, Vol.3, No.2 (1999)

- [6] Mine Action Information Center, Journal of Mine Action, James Madison University, <http://maic.jmu.edu/>
- [7] Humanitarian Demining, Developmental Technologies 2000-2001, DoD Humanitarian Demining R&D Program
- [8] Demining Technology Center, <http://diwww.epfl.ch/w3lami/detec/rodemine.html>
- [9] 柴田宗徳: 人道的対人地雷探知・除去ロボティクスの動向と展望, JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.13-19
- [10] K. Dawson-Howe et al.: The detection of buried landmines using probing robots, Robotics and Autonomous Systems, Vol.23, No.4 (1998) pp.235-243, <http://www.cs.tcd.ie/Kenneth.Dawson-Howe/Landmines/>
- [11] Y. Ahang et al.: Probabilistic Methods for Robotic Landmine Search, Proceedings of ICIRS (2001)
- [12] R. Chesney et al.: Terrain Adaptive Scanning of Conventional Mine Detectors, HUDEM'02 (2002) pp.69-74
- [13] Royal Military Academy, <http://mechatron.rma.ac.be/>
- [14] Y. Baudoin and E. Colon: Humanitarian Demining and Robotics State-of-the-art, Specifications, and On-going Research Activities, Proceedings of the Third International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2000) (October 2-4, 2000) pp.869-877
- [15] P. Gonzalez de Santos and M. A. Jimenez: Generation of discontinuous gaits for quadruped walking machines, Journal of Robotics Systems, Vol.12, No.9 (1995) pp.599-611
- [16] Q. J. Huang and K. Nonami: Humanitarian mine detecting six-legged walking robot and hybrid neuro walking control with position/force control, Mechatronics, Vol.13 (2003) pp.773-790
- [17] K. Nonami, Q.-J. Huang, D. Komizo, H. Uchida and N. Shimoi: Humanitarian Mine Detection Six-Legged Walking Robot, Proceedings of the Third International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2000) (October 2-4, 2000) pp.861-868
- [18] K. Nonami and Q.-J. Huang: Humanitarian Mine Detection Six-Legged Walking Robot COMET-II with Two Manipulators, Proceedings of the Fourth International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2001) (September 24-26, 2001) pp.989-996
- [19] K. Nonami et al.: Development and control of mine detection robot COMET-II and COMET-III, JSME International Journal, Vol.46, No.3, Ser.C (2003) pp.881-890
- [20] 野波健蔵: 地雷探知ロボットの開発, 電気学会誌, Vol.122, No.12 (2002) pp.838-841
- [21] 加藤恵輔ほか: 形状帰還形マスター・スレーブアームの提案と基礎実験, JRSJ, Vol.18, No.5 (2000) pp.136-141
- [22] 広瀬茂男ほか: 人道的対人地雷撤去作業の自動化技術, JRSJ, Vol.19, No.6 (2001) pp.722-727
- [23] 野波健蔵: 人道的地雷探知除去ロボットの開発, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1019 (2003) pp.807-810

第5章 机器人在研究与教育领域中的应用

机器人与研究和教育的关系可以从机器人本身的研究、利用机器人开展的研究、学习培训、推动科学技术教育等四个切入点来考虑。下面逐项加以说明。

5.1 机器人的研究

讨论机器人研究的问题应该从“机器人学”和“机器人工程学”两个方面加以考虑。

工程学是实现给定目的的技术体系,机器人工程学是以机械工程学、电气工程学、信息工程学等多种技术为基础,把它们综合起来加以实现(从工程学的角度)。不过,在研究人与机器人的关系时,如机器人与操作员之间,机器人与它服务的对象(人)之间,或者生产线上的机器人与员工之间的关系,往往还涉及心理学方面的知识(人文科学、社会科学知识)。至于机器人学,虽然它的历史很短,但它是位于上述领域基础之上的,是前人专门知识的总结。机器人学还应该包含机器人史,尽管它进入实用化的时间很短。在这一点上机器人学与建筑学非常相似。

所谓研究开发就是“为获得有关自然现象的新知识,或者将现有知识加以创造性应用的活动”。研究分为基础研究和应用研究两大类,前者不考虑特定应用对象,专注于建立新的理论,或者说是为了得到自然现象相关的新知识而进行的理论实践研究。开发则是为了验证从基础研究获得的知识的实用性、可行性而开展的活动。开发活动是利用研究获得的现成知识,制造新材料、新装置、新设备、新产品,或者对现有材料、装置、设备、产品进行改进^[1]。

工程学本来就是面向目标(面向需求)的知识体系,具体到机器人工程学,并不是说因为机器人属于应用领域,它的基础研究就不必涉及应用了。

谈到机器人学的基础研究,对象应该涉及本书第3篇“机器人的机构及控制”、第4篇

“智能技术”、第5篇“系统技术”、第6篇“新一代机器人基础技术”的内容。详细内容请参阅上述篇章。

谈到机器人的应用研究(开发),可以参阅第7篇“机器人在制造业中的应用”以及本篇其他章节的内容。

5.2 利用机器人开展的研究

眼下计算机仿真应用非常广泛,但通用的东西往往不是针对特定问题的,不是万能的。人们想出了一些不依赖计算机仿真而快速得到结果的方法,机器人就是其中之一。

在人工智能领域中,MIT(Massachusetts Institute of Technology)的Brooks于1986年提出了“包孕体系结构”(即通过简单反射层次的组合得到复杂智能行动的理论),并于1991年通过昆虫机器人进行了演绎验证^[2]。

在生物学学科领域,Kube和Bonabeau用多个简单移动机器人验证了蚁群协作搬运食物的原理^[3]。

“biomimetics”是一门从模仿自然,直至模仿自然界构造的科学,通过对生物组织的研究,它被应用于构建人类社会的人工系统。在对机器人手臂和腿的研究过程中,经过与机器人的对比,发现人的肌肉存在位置感觉和力觉两种机能。在双足步行机器人的研究过程中,经过从生物力学的角度考察人体腿部的结构和关节的结构,反过来影响到生理学和解剖学,下面我们来举一些相关的例子^[4]。

ATR开发Robovie的目的是设法克服机器人融入社会时所带有的不协调感。结果它解决了与人交流时所伴有的工程学、认知科学的分析问题,以及机器人应该如何结合自身肢体动作实现更人性化的动作和行为的问题。这些成果其实都与人和机器人的比较研究有关,是与人类自身的研究相通的^[5]。

每当我们开发人类自身所需要的器具时,

往往应该十分关注“使用者实际会如何使用”的问题。在进入受验者实际试验之前,往往面临器具安全的评估问题,或者在受验者参与实际试验后,又会面临他们长期依赖研究器具的问题,这些问题都让研究者感到十分棘手,因此人们往往愿意选用假人来替代实际受验者。岩手大学在了一项智能福利护理研究开发计划中研发了一种排泄支援系统,就借助了假人帮助确认使用者的动作,如体位、移动等。假人的这种应用形式实际上是属于机器人技术应用的范畴。我们期待机器人在这方面发挥更大的作用(图5.1和图5.2)。

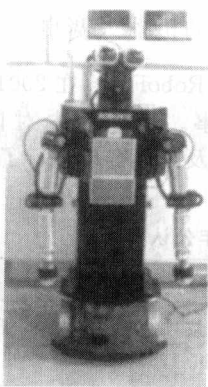


图 5.1 Robovie 机器人(ATR)



图 5.2 排泄支援系统(岩手大学)

5.3 机器人在学习、培训中的应用

5.3.1 教育培训

在对医疗从业人员的教育中,通常需要用假人模仿人或人体的某一个部位进行训练。众所周知,在CPR(救急救命方法)训练中一直使用着偶人,此外高性能的仿真器广泛应用于心脏病、心律不齐的仿真,以及各种症状如视诊、触诊、听诊、心电图等的仿真。

有人在牙科制作技术中引入患者机器人,它模仿人的头部,口腔内的牙齿模型带有压力传感器,属于上面所说的、典型的“利用机器人开展研究”,如果把这个模型用于牙科切削实习,那么又可以把它归入将机器人应用于教育和培训之列。如果不仅靠讲义讲授课程,而且通过仿真模型感受实际体验,这对定量地评价技术显然具有非常重要的意义^[6,7]。

机器人技术能够满足教育和训练系统的各种具体要求,当然在其他领域也有广泛的应用前景。

5.3.2 学习与机器人制作

要让学生持续保持对学习和探究的自发性和激情,以下两个方面非常重要^[8]:

① 明白目前学习的内容对于自己想做的事情(目的)有什么作用。由此获得学习的动力。具体的目的比抽象的目的更具有推动作用。

② 保持激情的秘诀是适时地获得成就感和满足感。目标不应该过于遥远或过于困难,可以把总目标适当地分解成阶段性目标。

面对问题,工程学的基本解决方式有两种:知识的,或者科学的。以培养工程人才为目标的教育机构,其任务就是培育学生的“工程头脑”。但是随着科学技术的发展,当代工程学领域不断扩大,专业分工更为细化,其结果使学生很难具有全局视野。所谓知识灌输型教育就是仅仅依靠课程计划讲授基本技术和基础理论知识,这样的教育方式显然难以培养学生的解决具体问题的能力。

从这个观点出发,可以说机器人既能起到实现多目标的作用,它又具有易于评价的特点。这就容易满足上面列举的①的要求。机器人制作还特别适合知识获取型教育理念,有助于培养学生解决问题的能力。当然,它也可以通过设定阶段性目标以满足适度的成就感,维持学生学习的热情。

实际上,机器人制作的步骤与一般产品的开发是相同的^[9]。在今天,一个产品涉及的技术门类很多,让每一位技术人员都经历下述所有技术环节的历练不大容易,不过通过机器人制作了解产品制作的步骤,培养坚韧不拔的精神是非常有意义的。另外,多个成员组成一个团队,也为学生提供了体验协作重要性的机

会。机器人制作的具体步骤如下:

- ① 提出要求。
- ② 进行调研。
- ③ 分析。
- ④ 创意。
- ⑤ 系统设计。
- ⑥ 子系统设计。
- ⑦ 制作。
- ⑧ 试验。
- ⑨ 兑现要求。

如前面所述,机器人涉及多个工程学领域,所以机器人制作还有更深一层的目的,就是让学生以相关工程学知识为背景,选择适当的应用领域,进一步掌握基础知识,理解应用的需求。可以说,学习机器人工程学的目的在于培养更宽广的工程能力。基于这样的观点,可以认为机器人制作对其他领域技术

人员的培养也具有非常重要的意义。

5.4 机器人对科学技术教育的推动作用

现在,日本全国有各种各样的机器人比赛,它们甚至被编入初中课程^[10]。目前还无法掌握比赛的确切数目,估计为 3000~4000 项。

如前面所述,对于学习机器人的人们来说,机器人比赛为他们设定了一个适当的、具有挑战性的目标,同时通过比赛又能够构建一个了解科学技术的社会环境。

5.4.1 日本的机器人赛事

表 5.1 为 RoboFesta 在 2001 年公开认可的机器人赛事。表 5.1 中对闻名遐迩的“RoboCoN”以及其他赛事进行了说明。

表 5.1 机器人赛事一览表(RoboFesta 2001 年公认赛事)

比赛名称(主办单位)	比赛概要(初次比赛年份)
日本机器鼠大会(新技术振兴财团机器鼠比赛委员会)	[机器鼠比赛] 在规定时间内和行走次数中,按自主型机器人(机器鼠)破解迷宫的行驶时间计分。分为 freshman 组和 expert 组(1980 年)
	[机器人赛车比赛] 自主机器人比赛,按时间计成绩。环形跑道包括圆弧和直线,在跑道线的一侧有拐角的标记(1986 年)
	[机器人赛车比赛少年组] 在制作间内装配机器人套件,沿引导线给出的环形跑道跑动,按时间计成绩(1999 年)
	[机器鼠操作比赛] 在规定时间内自主机器人寻找迷宫中竖立的圆筒,将其倒置,按数目计算成绩(1992 年)
智能机器人比赛(机器人比赛执行委员会)	让自主机器人在规定的时间内执行规定的作业,按得分或绩效计成绩。分为挑战组和专业组(1989 年)
IDC 机器人比赛大学国际交流大会(IDC 机器人比赛执行委员会)	由世界各个大学选拔学生,按不同国别组成 4~6 人的小组,在约 10 天的时间内,用给定的材料制作机器人,进行小组对抗赛(1990 年)
日本机器人相扑大会(富士软件 ABC(株)全日本机器人相扑大会委员会)	两台无线遥控自主机器人在圆形摔跤场(土俵)内相互推搡,将对手推出土俵外者胜出。机器人尺寸限制在宽 20cm、深 20cm 的方形体积内,质量小于 3kg(1990 年)
日本专科学校机器人比赛大会(日本专业学校信息教育协会)	利用巡线或光电传感器、限位开关等信息输入,进行机器人控制技术、快速性、手臂操作性的比赛(1992 年)
川崎机器人比赛大会(川崎市产业振兴财团 川崎机器人比赛大会执行委员会)	在边长为 1.8m 的方形场地内(四周用绳围成且有凸边),两台遥控型机器人进行 5s 比赛,将对方推倒或抵在绳上者胜出。机器人外形尺寸为宽 25cm、深 35cm,质量不得超过 3.5kg。但禁止装备恶意破坏对方的装置(1994 年)

续表 5.1

比赛名称(主办单位)	比赛概要(初次比赛年份)
日本微型计算机汽车拉力赛 (全国工业职高校长协会、北海道工业职高校长协会、微型计算机汽车拉力赛执行委员会)	配备微型计算机和光传感器等的模型汽车(机器人),在宽 30cm、长约 50m 的,由 S 形曲线、转弯、起伏地形组成的跑道上疾行的拉力赛(1996 年)
少年 RoboCup(梵天丸)(机械电子游戏会)	利用自主型机器人套件“梵天丸”做 8 字形循环运动比赛,按时间计成绩。也可以按机器人的动作效果计比赛成绩(1997 年)
机器人大奖赛(日本机械学会)	[大道艺机器人比赛] 模仿大道艺,按照机器人的独创性、技术性、艺术性、娱乐性计算比赛成绩(1997 年)
	[木偶机器人比赛] 利用电以外的能源驱动机械“木偶”,按照动作的趣味性、艺术性、创意性计算比赛成绩(1997 年)
	[机器人枪骑兵比赛] 要求内置能源和控制装置的枪骑兵(lancer)机器人在 100s 内沿场地线路进行移动,按照刺中路径两侧的目标得分计算成绩(1997 年)
	[机器人清道夫] 利用厚纸板,根据自己的创意改造遥控教育型机器人套件,让它将乒乓球放入方钢或塑料盒围成的球门内,按得分计算比赛成绩(2000 年)
RoboCup(RoboCup 日本委员会)	[实物小型组] 完全自主型机器人足球比赛。比赛场地为四周立有栅栏的乒乓球台,借助于安装在顶棚的全局视觉或机器人搭载的随机视觉识别赛球(橙色高尔夫球)。每队不超过 5 台机器人(1998 年)
	[实物中型组] 完全自主型机器人足球比赛。场地为长约 8m、宽约 5m 四周有栅栏的方形平台。机器人尺寸为小于直径 50cm 的圆形或 45cm 边长的方形。每队不超过 5 台机器人,赛球采用 4 号足球,不允许使用全局视觉,机器人为自主移动方式(2000 年)
	[RoboCup 少年组] 比赛规则无特别规定,由 3~5 台机器人组队,两队进行对抗赛。分为操纵型机器人组、自主型机器人组、软件机器人组(2001 年)
	[仿真组] 利用被称为“socket server”的足球仿真系统模拟比赛场地、球和选手的移动,由 11 名球员和 1 名教练组成参赛队,比赛场景通过 CG 三维显示(2001 年)
昆虫型机器人比赛会(科学技术振兴事业团)	[RoboCup 救助仿真组] 在计算机内虚拟大规模受灾城市的场景,根据地震、火灾等灾害现场的变化,队员指挥自制的智能体(虚拟机器人)进行活动,按照救助人数、阻止火势蔓延的面积计算得分(2001 年)
	组装内置触觉传感器、红外线传感器等的 6 足步行自主型昆虫机器人套件,在迷宫或有障碍物的场地上进行移动,按照计时计算比赛成绩(2000 年)
S. I. T. 拳击机器人比赛大会 (芝浦微型机器人执行委员会)	在制作间内装配双手 6 足有缆式拳击机器人,在 90cm×90cm 的拳台上进行比赛,将对方击倒或推出拳台者胜出(2000 年)
国际微型机器人联赛(名古屋都市产业振兴公司国际微型机器人联赛执行委员会)	[国际微型机器人成人比赛] 机器人的大小为 1cm ³ 。场地为 60cm 直线,其间 50cm 长的区域内设有标竿,或者场地为最大斜度 15°的铝圆盘,其上设有 9 个障碍块,按照通过场地所需时间计算成绩。另一组比赛利用 1in ³ 的自主型机器人(2001 年)
	[微型机构比赛] 在边长为 1cm 或 2cm 的立方体内制作机器人,载有 5 日元硬币配重爬竿,或者让两台机器人进行格斗,或者进行打滚比赛(2001 年)
AcroCup(NPO 法人 机器人技术应用委员会)	每队 4 台无线操纵水上机器人,在纵 2m、横 4m 的水池中进行水球比赛,按照规定时间内的得分决定胜负(2001 年)

续表 5.1

比赛名称(主办单位)	比赛概要(初次比赛年份)
救助机器人比赛(救助机器人比赛执行委员会)	按 1/8 比例制作若干个城市街区场地,放置模拟被害者的偶人,每个队操纵 3 台机器人搜索偶人,要求排除障碍物并将偶人运送至指定位置(2001 年)
伙伴机器人比赛(伙伴机器人大会执行委员会)	制定若干个服务主题,由独居老年人慰藉机器人进行比赛。但是这种比赛不同于往常的设定规则比赛,可以说是参赛者的方案比赛,因此也重视参赛者的概念陈述(2001 年)

参考:机器人创造国际比赛大会中央委员会(<http://www.robofesta.net/>)。表中列举的比赛内容为 2001 年的。

20 世纪 70 年代末期,IEEE 发起了“机器鼠比赛”。日本于 1980 年举办了第一届全日本机器鼠大会,此后每年的比赛都会增加新的项目。

“创意的对决——日本高等专科学校机器人比赛(俗称:高专 RoboCoN)”是由东京工业大学森政弘教授(当时)等发起的创意比赛,参赛对象以高等专科学校的学生为主。1988 年举办了第一届比赛。该比赛由于有 NHK 电视台直播,因而得到很多人的认同,目前这个由高等专科学校协会联合会和 NHK 电视台共同主办的比赛已经成为每年一度的赛事。1991 年,以大学生为对象的“NHK 大学 RoboCoN”也起烽烟,这一组比赛从 2002 年改换门庭,成为亚太广播联盟(ABU)的“ABU 机器人比赛”的日本国内代表队选拔大会。

1990 年,东京工业大学控制工程系和 MIT 机械工程系发起“机器人主题设计和制作比赛”,命名为 IDC(International Design Contest)RoboCoN 并获得 NHK 电视台的资助沿袭至今。此外,还有各种其他比赛,例如,有一种 MIT 方式的比赛,是在设定制作条件、工作条件、时间等共同环境下进行的比赛^[11]。

1990 年开始的以工业职高生为对象的“机器人相扑大会”被舆论评选为有益于青少年技术教育的机器人赛事之一。据说每年的报名者众多,总报名的人数超过 3000 队。

1997 年,日本机械学会主办了首届“机器人大奖赛”,它也得到广泛的支持,特别是大道艺机器人比赛,除了“让观众愉悦”之外没有任何比赛规则,因而每年的参赛机器人都是多姿多彩,人气很旺,适合培养参与者的“创造性”。

“RoboCup 机器人比赛”始于 1998 年,它

模仿最受欢迎的运动——足球比赛,要求多个机器人上场,需要借助于视觉传感器等技术,目前它已经发展成为以大学研究室为中心的有组织的国际赛事,其活动规模正在不断扩大。机器人比赛一方面具有教育意义,另一方面也与研究开发密切相关。

5.4.2 机器人创造国际比赛大会(RoboFesta)

机器人创造国际比赛大会是一项以机器人为主题的国际赛事,其目标在于构建一个比科学技术更贴近生活,更有亲切感的环境。它的具体目的如下:

- ① 加深人们对科学技术的理解,赋予美丽的幻想。
- ② 推进人类与科学技术的共同繁荣。
- ③ 向 21 世纪的国际社会传递信息。

1998 年创立了机器人创造国际比赛大会中央委员会理事局,经过一段时间的准备后,“RoboFesta 2001”于 2001 年 7~11 月在以大阪为中心的关西地区和神奈川县 4 市(横须贺市、川崎市、相模原市、横滨市)轮流举办。比赛内容除了先前举办的与各种机器人相关的赛事外还有新的内容,表 5.1 中列举的 27 项比赛都得到了政府的认可。约有 2500 台机器人和 5000 名选手参加了比赛,其中海外参赛队来自 20 个国家,达 132 人之多。展出的机器人约 400 台,总参观人次约 56 万。图 5.3 为 RoboFesta 的初中生机器人比赛会场场景^[12]。

可喜的是 RoboFesta 正在走向海外。例如,新西兰举办了 RoboFesta 2001,马来西亚举办了 RoboFesta 2002,其他的亚洲各国和欧洲各国也有举办的计划。

中野荣二 增田良介 市川 诚

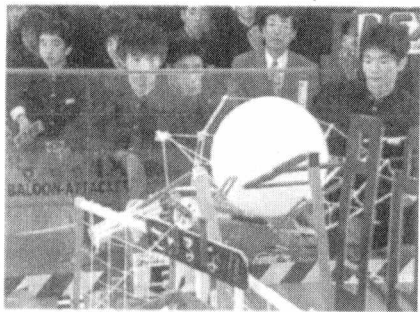


图 5.3 初中生机器人比赛会(RoboFesta)

5.5 机器人的研究开发

在第1篇第1章中指出,“机器人”这个名词并无一个公认的定义。然而,机器人研究的趣味性、研究成果的发表数量呈现出逐年增加的趋势,日本也好,国际上也好,自制机器人的各项赛事盛况空前。这样的局面也许正是得益于“机器人”没有确定定义而带来的宽松气氛。一般来说,针对没有定义的对象所开展的研发往往意味着它的成果属于个别技术的堆砌。也就是说,这样的研发尽管在内容上有创立新学科领域的可能性,但是往往呈现出囿于工程学的、非体系知识的简单堆砌的危险性。因此,为了让知识成为机器人研究的共同财产,必须从机器人工程学的角度来客观地审视具体研究开发的地位(意义)。工程学是属于面向需求的知识体系,机器人工程学的历史尚短,它正处于领域不断扩大的态势,把握它的总体状况往往比较困难,编者期待着本书在这方面能够对读者有所补益。

至于未来机器人的研究开发趋势,可以给出以下四个应该关注的研究方向。

1. 功能和形态的最优化

机器人的功能和自身的形态有密切的联系。确定机器人功能(性能规格)时,设计者首先应该进行形态研究。例如,手部手指的数目、手臂关节的自由度及其分配,拟人机器人的总体形式和相似性等都是研究对象,适应功能要求达到形态的最优化是当前研究的一个重要领域。

2. 智能的创发

目前,机器人智能都是通过软件来实现的,再由智能对操作设备的硬件起作用,使机

器人得以运动。假如能够确立一种方法,能够靠识别外部行为创发出新的智能(软件),想必这会引发未来智能机器人发展的巨大变革。

3. 机器人与人类的共存问题

在工业机器人时代,人与机器人之间保持着一定的距离,可见机器人发展的历史原本是否定人与机器人共存的。今天的精神慰藉机器人等实例表明,我们必须正视二者的共存问题,它必将成为21世纪的研究课题之一。

4. 有用性

机器人属于人造物,它一定追求某种现实的有用性。有的机器人以大量生产为前提,而有的则以极限作业(如放射线)环境下的有用性为前提,虽然两者之间的可比性不强,但是研究开发的费用当中肯定包含了有用性的评价标准。在应用机器人技术的时候,无论有用性具有怎样的广义性和实用性,从经济、文化角度的考量应该是不可或缺的。

梅谷阳二

参考文献

第5章 机器人在研究与教育领域中的应用

- [1] 今野浩一郎: 研究開発マネジメント入門, 日本経済新聞社 (1993) pp.16-17
- [2] R. A. Brooks: A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Robotics and Automation, Vol.2, No.1 (1986) pp.14-23
- [3] Kube and Bonabeau: Cooperative transport by ants and robots, Robotics and Autonomous Systems Vol.30, No.1/2 (2000)
- [4] バイオミメティックス編集委員会: バイオミメティックスハンドブック, NTS出版 (2000)
- [5] ATR ホームページ,
<http://www.irc.atr.co.jp/index-j.html>
- [6] 京都科学 WEB,
<http://www.kyotokagaku.co.jp/>
- [7] 宮入裕夫: 患者ロボットによる歯科切削技術の評価, JRSJ, Vol.14 No.5 (1996) pp.28-32
- [8] 油田信一: ロボットを通じた工学教育, JRSJ, Vol.16, No.4 (1998) pp.7-11
- [9] 川上誠ほか: 沼津高専の自律移動ロボット開発教育への取り組み, JRSJ, Vol.16, No.4 (1998) pp.35-39
- [10] 下山大: 7回目を迎えた八戸三中のロボコンから得られたもの, JRSJ, Vol.16, No.4 (1998) pp.40-43
- [11] IDC ロボコンの歴史,
http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/research_robotics.html
- [12] ロボット創造国際競技大会ホームページ,
<http://www.robofesta.net/>

Robootics Handbook

附录

永 州

1 机器人的 JIS 标准

附表 1.1 给出了 JIS 标准中有关机器人的规定。附表 1.2 给出 JIS 标准中有关无人搬运车(属于移动机器人的一类)的规定。此外,日本机器人工业协会也制定了一些与机器人相关的行业标准。值得指出的是,在技术不断进步和与国际标准接轨的过程中,无论是 JIS 标准还是行业标准,制定新标准,或

是定期地进行修订,或是废止旧标准都是十分正常的事情。我们推荐的做法是始终参照最新的标准和行规(日本工业标准调查会 <http://www.jisc.go.jp>)。

因为与术语有些关联,故本附录还从《工业机器人——图形符号》(JIS B 0138-1996)中摘录了一些内容。

附表 1.1 机器人的 JIS 标准

编 号	JIS 名称	适用范围	对应国际标准
JIS B 0134-1998	工业机械手 ——术语	该标准规定了工业机械手有关的主要术语和定义	ISO 8373:1994 Manipulating Industrial robots—Vocabulary
JIS B 0138-1996	工业机器人 ——图形符号	该标准规定了工业机器人中机构的图形和符号	
JIS B 0185-2002	智能机器人 ——术语	该标准规定了与智能机器人有关的主要术语和定义	
JIS B 0186-2003	移动机器人 ——术语	该标准规定了与移动机器人有关的主要术语和定义	
JIS B 0144-2000	电子元器件装配机器人 ——术语	该标准规定了电子元器件装配机器人有关的主要术语和定义	
JIS B 8431-1999	工业机械手 ——特性的表示方法	该标准规定了制造厂家表示机器人特性的方法	ISO 9946:1999 Manipulating industrial Robots-Presentation of characteristics
JIS B 8432-1999	工业机械手 ——性能项目和试验方法	该标准规定了工业机械手各项性能的定义和试验方法,具体内容如下: • 姿态精度和姿态重复精度 • 姿态在多方向上的重复精度 • 距离精度和距离的重复精度 • 定位调整时间 • 位置超调量 • 姿态特性漂移	

续附表 1.1

编 号	JIS 名称	适用范围	对应国际标准
JIS B 8432-1999	工业机械手 ——性能项目 和试验方法	<ul style="list-style-type: none"> • 交换精度 • 路径精度和路径重复精度 • 姿态变化的路径精度 • 拐角特性 • 路径速度特性 • 最短移动时间 • 静态柔顺性 • 横摆运动特性 (后略)	ISO 9283:1998 Manipulating industrial Robots-Performance criteria and related test methods
JIS B 8433-1993	工业机械手 术语——安全性	该标准是工业机械手与机器人系统在设计、制造、编程、运转、使用、维护、修理时必须考虑的安全因素的指南(后略)	ISO 10218:1992 Manipulating industrial Robots—Safety
JIS B 8436-1996	工业机械手 ——机械接口 ——法兰形式 (A 形)	该标准规定了圆形法兰机械接口(A 形)的主要尺寸、名称和表示方法。其目的在于保证手动装卡时末端执行器的互换性和安装的再现性(后略)	ISO 9409-1:1996 Manipulating Industrial Robots—Mechanical inter- faces—Part 1:Plates(form A)
JIS B 8437-1999	工业机械手 ——坐标系及 运动符号	该标准规定了与机器人固定、试验、编程有关的坐标系以及描述基本运动的符号、下标等	ISO 9787:1998 Manipulating Industrial Robots—Coordinatie systems and motion nomenclatures
JIS B 8439-1992	工业机器人 ——编程语言 SLIM	该标准规定了 SLIM 程序语言的描述形式和功能。该语言的特点是能够提高主要用于装配作业的各种机器人之间动作程序的可移植性	
JIS B 8440-1995	工业机器人 ——中间代码 STROLIC	该标准规定了机器人控制器内中间代码 STROLIC 的描述形式和功能,该语言的特点是能够提高各种工业机器人之间中间代码层动作程序的可移植性(后略)	
JIS B 8441-1996	工业机械手 ——机械接口 ——圆轴形式 (A 形)	该标准规定了圆柱突起轴形机械接口(A 形)的主要尺寸、名称和表示方法。其目的在于保证手动装卡时末端执行器的互换性和安装的再现性(后略)	ISO 9409-2:1996 Manipulating Industrial Robots—Mechanical inter- faces—Part 2:shafts(form A)
JIS B 8442-1997	工业机械手 ——末端执行 器自动交换装 置——术语和 特性的表示 方法	该标准规定制造环境下应用的机器人末端执行器自动交换装置的术语(后略)	ISO 11593:1996 Manipulating Industrial Robots-Automatic end effector exchange systems—Vocabu- lary and presentation of charac- teristics
JIS B 8443-2000	工业机械手 ——抓握型夹 持器的处理对 象——术语和 特性的表示 方法	该标准关注末端执行器的功能,重点在于 4.1.2.1 所定义的抓握型夹持器。主要规定了搬运对象物的术语,以及抓握型夹持器的功能、结构、基本零件的术语(后略)	ISO 14539:2000 Manipulating Industrial Robots—Object handling with grasp-type grippers— Vocabulary and presentation of characteristics

续附表 1.1

编 号	JIS 名称	适用范围	对应国际标准
JIS B 8460-2002	电子元器件装配机器人——特性和功能的表示方法	该标准规定了电子元器件装配机器人的特性、功能等的表示方法。该标准也适用于黏合剂涂布机、焊接剂黏结胶印刷机等相关装置	
JIS B 8461-2002	电子元器件装配机器人——接口	该标准规定了组装印制电路板生产线时电子元器件装配机器人、周边设备的机械、电气接口,以及机器人的实用连接方法	
JIS B 8462-2000	电子元器件装配机器人——安全性	该标准规定了电子元器件装配机器人在设计、制造、编程、运转、使用、维护、修理时必须考虑的安全因素。该标准也适用于黏合剂涂布机、焊接剂黏结胶印刷机等相关装置	
JIS B 6015-1996	机床——电气装置通则	该标准的对象限于电源电压 600V 以下、电源频率 50Hz(或 60Hz)的机床电气装置 备注 1:该规格也适用于机床附属的装配、搬运、检测的自动设备的电气装置 备注 2:该标准的电气包括电气和电子 备注 3:该标准的设备是指 3.1 中规定的机床	IEC 204-1:1992 Machine tools—Electrical equipment—General requirements
JIS B 9960-1999	设备的安全性——设备电气装置——第一部分:一般要求事项	该标准适用于运行中非人工移动的设备的电气/电子装置和系统,也适合连续运转的多台设备。但不包括更上一层的系统(即系统之间的通信)(后略)	IEC 60204-1:1997 Safety of machinery—Electrical equipment of machines—Part 1:General requirements
JIS B 3000-1997	FA——术语	该标准规定了主要在机械工业中应用的设施和自动化的术语,以及定义(后略)	

附表 1.2 无人搬运车的 JIS 标准

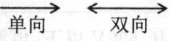
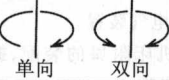




编 号	JIS 名称	适用范围	对应国际标准
JIS D 6801-1994	无人搬运车系统——术语	该标准规定了与无人搬运车(含无人牵引车、无人叉车)系统相关的主要术语和定义	
JIS D 6802-1997	无人搬运车系统——安全通则	该标准规定了以无人搬运车(含无人牵引车、无人叉车)为中心的搬运系统从计划引进阶段到设置、运行阶段保证安全的一般事项	
JIS D 6803-1994	无人搬运车——设计通则	该标准规定了设计无人搬运车(含无人牵引车、无人叉车)时相关的条件、结构、安全、性能等内容	
JIS D 6804-1994	无人搬运车系统——设计通则	该标准规定了引进以无人搬运车(含无人牵引车、无人叉车)为中心的无人搬运车系统时需要计划和研讨的事项,以及设计无人搬运车系统时涉及的一般事项	
JIS D 6805-1994	无人搬运车系统——特性/功能试验方法	该标准规定了与无人搬运车(含无人牵引车、无人叉车)有关的特性和功能试验的方法	

2 工业机器人的图形符号

在《工业机器人——图形符号》(JIS B 0138-1996)中规定了有关工业机器人采用的机构的图形,以及与此相关的符号。附表 2.1~

附表 2.3 分别摘要地给出基本图形符号和机构的图形符号。需要注意的是,这些图形符号与最早 JIS 所制订的已经有了很大的变化。




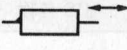













附表 2.1 图形符号的基本表示方法

序号	名称	图形符号
1	直线移动方向	
2	旋转方向	
3	关节轴,杆件(连杆)	
4	连杆的固定结	
5	基准面	
6	机械接口	

附表 2.2 坐标系的文字符号

序号	图形符号	名称
1	X, Y, Z	坐标系
2	X_0, Y_0, Z_0	
3	X_1, Y_1, Z_1	
4	X_m, Y_m, Z_m	
5	X, Y, Z, x, y, z	机器人的运动
6	A, B, C	

附表 2.3 机构的图形符号

序号	名称	自由度	图形符号	运动方向	备注
1	移动关节(1)	1			
2	移动关节(2)	1			
3	旋转关节(1)	1			
4	旋转关节(2)	1			平面
5		1			立体
6	圆柱关节	2			
7	球关节	3			
8	末端执行器				一般形式 不同用途示例  焊接  真空吸附

3 人体关节的可动范围

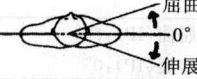
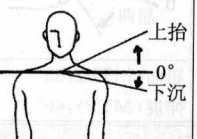



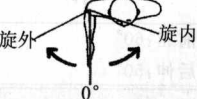

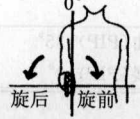
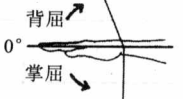
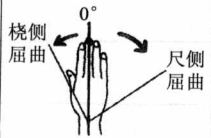



在开展机械手、步行机器人的研究,或者将机器人技术向医疗康复领域拓展应用时,了解人体关节的可动范围是很有必要的。人体关节分为铰链型和球型两大类。前者围绕某一根轴为中心进行屈曲和伸展,后者则有好几个轴,可以向多个方向运动。

人体各个关节的可动范围(ROM: Range Of Motion)的测量方法和表示方法是由日本康复医学会和整形外科学会制定的。表1摘要给出部分数据,详细的情况可以参阅有关文献。在计算角度时都取被动运动的价值,基本轴原则上都取站立位,各个关节大都取解

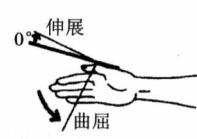
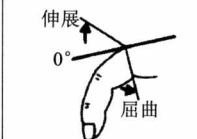
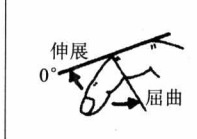


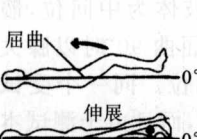

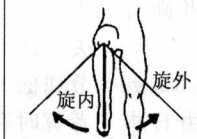




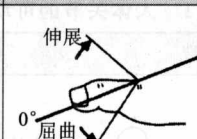

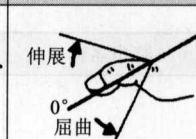
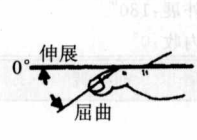


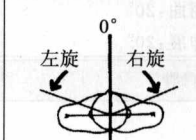


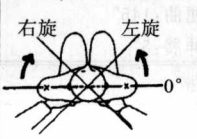

剖学的肢体位为 0° 此外,肩关节的水平屈曲/伸展以肩关节外展 90° 肢体位为中间位,肩关节的旋外/旋内在肩关节外展 0° 时以肘关节 90° 屈曲肢体位为中间位,前臂的旋前/旋后在手掌面位于矢状面内时以肢体为中间位,髋关节的旋内/旋外在髋关节屈曲 90° 时以膝关节屈曲 90° 的肢体位为中间位。同一个受试者有时存在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的误差,而且由于测试本身也存在误差,因此表中所列之值仅供参考。

有了各个关节的可动范围数据和人体各个组成部分的具体尺寸,我们当然就能够很容易地求出人体的工作空间。

附表 3.1 人体关节的可动范围

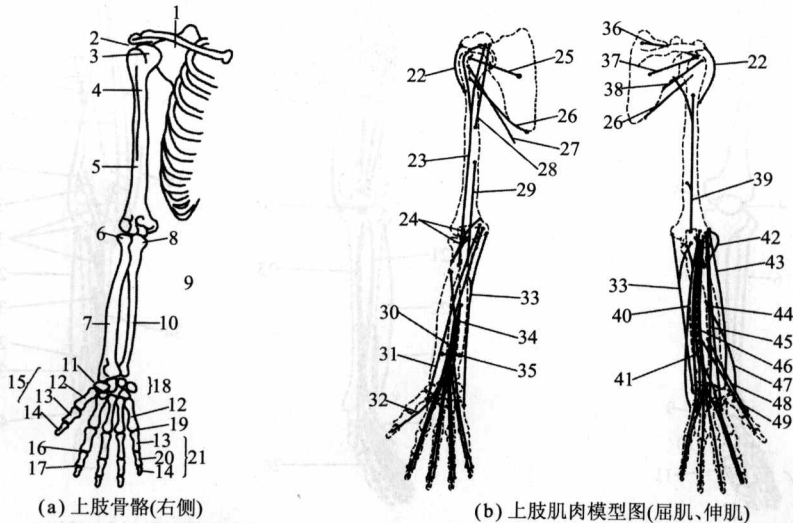
部位名称	肩胛带		肩(包括肩胛骨)	
测量肢体位的参考图				
运动方向;	屈曲: 20°	上抬: 20°	前屈(前方上举): 180°	外展: 180°
可动角度的参考范围;	伸展: 20°	下沉: 10°	后伸(后方上举): 50°	内收: 0°
肩(包括肩胛)		肩(尺骨)	肘	前臂
				
内收: 75°	水平屈曲: 135° 水平伸展: 30°	旋外: 60° 旋内: 80°	屈曲: 145° 伸展: 5°	旋前: 90° 旋后: 90°
手		拇指		拇指(第一节拇指骨)
				
掌屈: 90° 背屈: 70°	桡侧屈曲: 25° 尺侧屈曲: 55°	桡侧外展: 60° 尺侧内收: 0°	掌侧外展: 90° 掌侧内收: 0°	屈曲: 60° 伸展: 10°

续附表 3.1

拇指(第2节拇指骨)	指(食指至小指的第1节指骨)	指(食指至小指的第2节指骨)	指(食指至小指的第3节指骨)	
				
屈曲: 80° 伸展: 10°	屈曲: 90° 伸展: 45°	屈曲: 100° 伸展: 0°	屈曲: 80° 伸展: 0°	外展: — 内收: —
髋		膝		踝
				
屈曲: 125° 伸展: 15°	外展: 45° 内收: 20°	旋外: 45° 旋内: 45°	屈曲: 130° 伸展: 0°	足跖屈: 45° 足背屈: 20°
足 部		拇指(第一节趾骨)	拇指(第2节趾骨)	趾(第2趾~5趾的第1节趾骨)
				
外翻: 20° 内翻: 30°	外展: 10° 内收: 20°	屈曲(MTP): 35° 伸展(MTP): 60°	屈曲(IP): 60° 伸展(IP): 0°	屈曲(MTP): 35° 伸展(MTP): 40°
趾(第2趾~5趾的第2节趾骨)	趾(第2趾~5趾的第3节趾骨)	颈 部		
				
屈曲(PIP): 35° 伸展(PIP): 0°	屈曲(DIP): 50° 伸展(DIP): 0°	前屈: 60° 后伸: 50°	右旋: 60° 左旋: 60°	右屈: 50° 左屈: 50°
胸、腰部				
				
前屈: 45° 后伸: 30°	右旋: 40° 左旋: 40°	右屈: 50° 左屈: 50°		

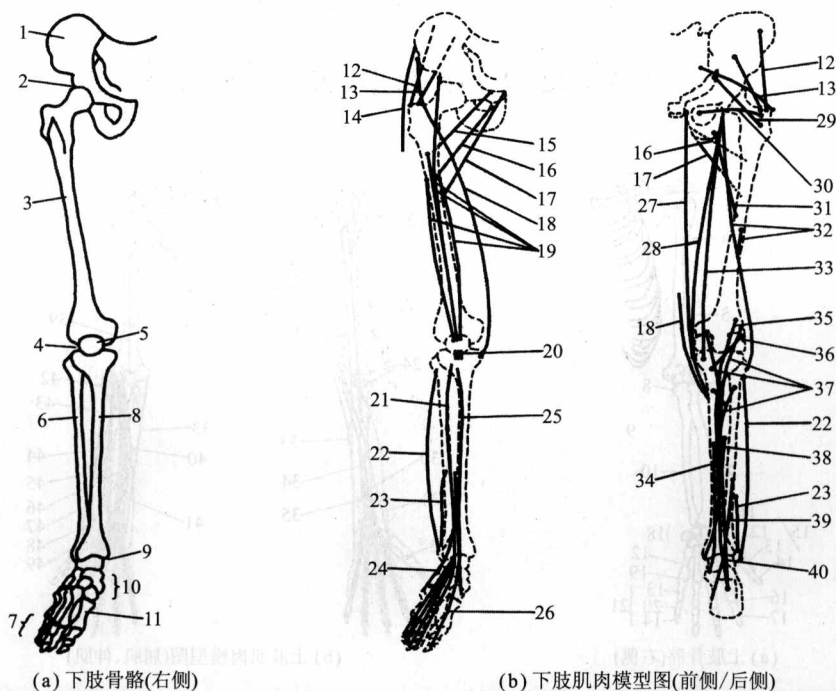
注:日本康复医学会评价标准委员会编制,“关节可动范围的表示及测量方法(日本康复医学会·日本整形外科学会):1995”,《康复医学》:Vol. 32(1995)pp. 208~217

4 人体关节、骨骼和肌肉的名称^[2]



No.	中文	英文	No.	中文	英文
1	肩胛骨	blade, bone, scapula	26	大圆肌	teres major muscle
2	肩关节	shoulder joint	27	广背肌	broadest muscle of back
3	肱骨头	head of humerus	28	乌口腕肌	coracobrachial muscle
4	大节骨嵴	crest of greater tubercle	29	肱肌	brachial muscle
5	肱骨	humerus	30	指深屈肌	deep flexor muscle of finger
6	桡骨小头	head of radius	31	桡侧腕屈肌	radial flexor muscle of wrist
7	桡骨	radial bone, radius	32	拇长屈肌	long flexor muscle of thumb
8	肘关节	cubital joint	33	尺侧腕屈肌	ulnar flexor muscle of wrist
9	前臂骨	forearm bone	34	指浅屈肌	superficial flexor muscle of finger
10	尺骨	ulna	35	旋前方肌	quadrante pronator muscle
11	腕关节	joints of hand	36	冈上肌	supraspinous muscle
12	掌骨	metacarpal bone	37	冈下肌	infraspinous muscle
13	第1节指骨	proximal phalanx	38	小圆肌	teres minor muscle
14	第3节指骨	distal phalanx	39	肱三头肌	triceps muscle of arm
15	拇指骨	phalanx of thumb	40	尺侧腕伸肌	ulnar extensor muscle of wrist
16	近位指节间关节	proximal interphalangeal joint, PIP joint	41	食指伸肌	extensor muscle of index finger
17	远位指节间关节	distal interphalangeal joint, DIP joint	42	旋后肌	supinator muscle
18	腕骨	carpal bone	43	肱桡肌	brachioradial muscle
19	掌指关节	metacarpophalangeal joint, MP joint	44	桡侧腕长伸肌	long radial extensor muscle of wrist
20	第2节指骨	middle phalanx	45	桡侧腕短伸肌	short radial extensor muscle of wrist
21	指骨	phalanx	46	(总)指伸肌	common extensor muscle of digits (extensor muscle of fingers)
22	三角肌	deltoid muscle	47	拇长展肌	long abductor muscle of thumb
23	肱二头肌	biceps muscle of arm	48	拇短伸肌	short extensor muscle of thumb
24	旋前圆肌	round pronator muscle	49	拇长伸肌	long extensor muscle of thumb
25	肩胛下肌	subscapular muscle			

附图 4.1 人体上肢骨骼和肌肉的名称^[1,2]



No.	中文	英文	No.	中文	英文
1	髋骨	coxal bone	21	趾长伸肌	long extensor muscle
2	髋关节	hip joint	22	腓骨长肌	long peroneal muscle
3	股骨	thigh bone, femur	23	腓骨短肌	short peroneal muscle
4	膝关节	knee joint	24	第3腓骨肌	third peroneal muscle
5	髌骨	patella	25	胫骨前肌	anterior tibial muscle
6	腓骨	calf bone, fibula	26	拇长伸肌	long extensor muscle of great toe
7	趾骨	phalanx	27	股薄肌	gracilis muscle
8	胫骨	tibia	28	半腱肌	semitendinosus muscle
9	踝关节	ankle joint	29	臀大肌	gluteus maximus muscle
10	跗骨	tarsal bone	30	闭孔外肌	external obturator muscle
11	跖骨	metatarsal bone	31	大收肌	great adductor muscle
12	臀中肌	gluteus medius muscle	32	股二头肌	biceps muscle of thigh
13	臀小肌	gluteus minimus muscle	33	半膜肌	semimembranosus muscle
14	阔筋膜张肌	tensor muscle of fascial lata	34	趾长屈肌	long flexor muscle
15	耻骨肌	pectineal muscle	35	足底肌	plantar muscle
16	短收肌	short adductor muscle	36	腓肌	popliteal muscle
17	长收肌	long adductor muscle	37	小腿三头肌	triceps muscle of calf
18	缝匠肌	sartorius muscle	38	胫骨后肌	posterior tibial muscle
19	大腿四头肌	quadriceps muscle of thigh	39	拇长屈肌	long flexor muscle of great toe
20	膝盖韧带	patellar ligament	40	跟腱	Achilles tendon

附图 4.2 人体下肢骨骼和肌肉的名称^[1,2]

参考文献

- [1] 金子: 日本人体解剖学, 南山堂(1975)
- [2] 英和人体用語編集委員会: 臨床に必要な英和和英人体用語集(第2版), ユリシス出版部(1996)

5 机器人安装空间

在很多场合,机器人移动和作业的环境条件,即建筑物内部的结构,都是由建筑标准事先规定好了的。例如,在附表 5.1、附表 5.2 中给出了走廊的宽度和阶梯的尺寸。例如,踏步面宽度的合理值规定为它不应该比鞋子更短,踏步高度应该在 30° 左右,在建筑标准中都规定了它们必须遵守的最低值。

对于大众公共建筑物来说,根据“促进老年人、身体残障者等顺畅通行的特定建筑物法律(温馨建筑物法)”,特定的建筑物(如医院、剧场、会议厅、展览馆、老人公寓等)如果面积超过 2000m^2 ,在进行设计时有义务遵守

让身体残障者等顺畅通行的规定。其他场所(如学校、办公楼、公寓等)在设计时也有义务努力遵守这个规定。相关规定摘列于附表 5.3 中。

现代社会福利的一个重要理念是构建一个任何人,包括高龄者和残障者在内的和谐居住、和谐生活的社会环境,即所谓的“常态”。建筑物的无障碍设计是指在物理上去除阶梯障碍,为视觉残障者设置路牌等。实际上,这些设计方法与机器人技术在康复领域的应用研发是分不开的,它们都是以对象为中心的两个互补的方面。

附表 5.1 走廊的最小宽度(建筑基准法施行令第 119 条)

	适用于小学、初中、高中或中等专科学校的儿童或学生	医院患者用的走廊公寓住户总面积超过 100m^2 的楼层的公共走廊房间总面积超过 200m^2 (地下室 100m^2) 的楼层的走廊(不包括 3 室以下的专用走廊)
两侧有房间的走廊(中廊)	2.3m	1.6m
其他场合(单廊)	1.8m	1.2m

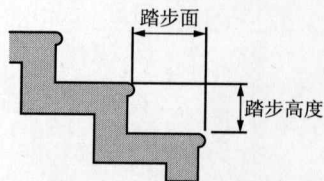
附表 5.2 阶梯踏步级宽、踏步高度、踏步面的尺寸

序号	阶梯类别	踏步和平台的级宽	踏步高度	踏步面尺寸
1	小学儿童使用的阶梯	$\geq 140\text{cm}$	$\leq 16\text{cm}$	$\geq 26\text{cm}$
2	中学、高中、中等专科学校的学生使用的阶梯。面积大于 1500m^2 的店铺。剧场、电影院、演出场、观光场所、会馆、会议厅等公共场所的阶梯	$\geq 140\text{cm}$	$\leq 18\text{cm}$	$\geq 26\text{cm}$
3	总面积超过 200m^2 的地上房间的直通阶梯,或总面积超过 100m^2 的地下室阶梯,或地下建筑物内的阶梯	$\geq 120\text{cm}$	$\leq 20\text{cm}$	$\geq 24\text{cm}$
4	序号 1~3 以外的阶梯	$\geq 75\text{cm}$	$\leq 22\text{cm}$	$\geq 21\text{cm}$
5	室外阶梯(直通)	$\geq 90\text{cm}$	同序号 1~4	
6	其他室外阶梯	$\geq 60\text{cm}$		
7	住宅(不包括公寓公用阶梯)	$\geq 75\text{cm}$	$\leq 23\text{cm}$	$\geq 15\text{cm}$
8	电梯设备间	任意	$\leq 23\text{cm}$	$\geq 15\text{cm}$

注: * 摘自建筑基准法施行令第 23 条、120 条、121 条。

* 在 1、2 中的若阶梯高度超过 3m,则每 3m 内应该设计一个踏步面进深超过 1.2m 的平台,而其他阶梯若高度超过 4m,则每 4m 内应该设计一个踏步面进深超过 1.2m 的平台。

* 如果用斜坡代替阶梯,则其斜度不得超过 $1/8$ (第 26 条)。



附表 5.2 的附图 阶梯的尺寸

附表 5.3 温馨建筑物法的顺畅通行标准(摘录)

适用场所		无障碍标准	推荐标准
出入口	大门出入口的宽度	$\geq 80\text{cm}^{*1}$	$\geq 120\text{cm}$
	房间出入口的宽度	$\geq 80\text{cm}$	$\geq 90\text{cm}$
走廊等	走廊宽	$\geq 120\text{cm}^{*2}$	$\geq 180\text{cm}^{*3}$
斜坡路	扶手	单侧	双侧
	斜坡宽度	$\geq 120\text{cm}$	$\geq 150\text{cm}$
	斜度	$\leq 1/12$	$\leq 1/12$, 室外 $\leq 1/15$
电梯	出入口宽度	$\geq 80\text{cm}$	$\geq 90\text{cm}$
	乘坐箱面积	$\geq 1.83\text{m}^2$	$\geq 2.09\text{m}^2$
	升降门廊	$\geq 150\text{cm}$ (边长)	$\geq 180\text{cm}$ (边长) *4
引道	道路宽度	$\geq 120\text{cm}$	$\geq 180\text{cm}$

注:“促进老年人、身体残障者等顺畅通行的特定建筑物法律(温馨建筑物法)”(2001年7月12日修订)

<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/hbl.htm>

*1:轮椅的宽度为65cm,加上开口部分左右的间隙,该数据应该是使用的最小尺寸。

*2:该尺寸为轮椅转弯所必需的。

*3:该尺寸是为轮椅行进时发生摆动预留的。

*4:该尺寸是轮椅以车轴中央为回转中心作180°调转所预留的。

附录 5.3 温馨建筑物法的顺畅通行标准(摘录)

场所	无障碍标准	推荐标准	备注
出入口	$\geq 80\text{cm}$	$\geq 120\text{cm}$	在出入口处,应设置轮椅通道。
走廊	$\geq 120\text{cm}$	$\geq 180\text{cm}$	在走廊中,应设置轮椅通道。
斜坡路	$\geq 120\text{cm}$	$\geq 150\text{cm}$	在斜坡路上,应设置轮椅通道。
电梯	$\geq 150\text{cm}$	$\geq 180\text{cm}$	在电梯中,应设置轮椅通道。
引道	$\geq 120\text{cm}$	$\geq 180\text{cm}$	在引道上,应设置轮椅通道。

6 电气元器件新旧图形符号对照

《电气元器件图形符号》(JIS C 0617, IEC 60617)在1997—1999年作了重大修订。本书 IEC 旧图形符号时进行参考。除电阻外全部采用新的图形符号。附表 6.1

附表 6.1 电气元器件新旧图形符号对照表

新图形符号	旧图形符号	说 明
		电阻
		电感线圈 线圈 扼流圈
		有极性电容器 (电解电容器等)
		电容器
双线制用 单线制用 		变压器(有铁心)
		半导体二极管
		发光二极管(LED)
		NPN 晶体管
		扬声器
(电珠、白炽灯)(荧光灯) 		灯
		闭合触点

索引

中文	日文	页码
A		
阿克曼型转向机构	アッカーマン型ステアリング	383
安德罗丁	アンドロイド	4
安全	安全,セキュリティ	745,976
安全确认原则	安全確保の原理	987
B		
八叉树	8分木,オクトツリー	686
摆动缸	揺動型アクチュエータ	153
摆动腿	遊脚	408
摆动相	遊脚相	430
摆线移动车	トロコイド移動車	380
搬运位置修正	ハンドリング位置補正	975
搬运系统	搬送システム	931
半导体压力传感器	半導体圧力センサ	113
半双工模式	半二重モード	79
半正定	半正定(準正定)	21
包紧抓握	包み込み把握	355
包孕体系结构	サブサンプションアーキテクチャ	1090
保安机器人	警備ロボット	1019
保持力	保持力	139
贝塞尔曲线	ベジエ曲線	688
贝叶斯定理	バイズの定理	548
贝叶斯公式	バイズの公式	512
贝叶斯决策理论	バイズ決定理論	548
被动步行机器人	受動歩行ロボット	407
被动传感器	パッシブセンサ	102
被动关节	受動関節	230
被动视觉	受動視覚	498,500
被动型传感器	受動型センサ	124
被动约束	受動拘束	360
被动自由度	受動自由度	230
被覆层保护机器人	ブランケット保守用ロボット	1027
比例控制阀	比例制御弁	154
比率发电机	レートジェネレータ	97
闭环控制	閉ループ制御	52
闭链杆件系统的运动分析	閉リンク系の運動解析	672
闭式机构	閉ループ機構	256
闭式链机构	閉リンク機構	267
闭式链机械手	パラレルマニピュレータ	227
壁面爬行	壁面歩行	433
壁面吸附式移动机构	壁面吸着移動機構	452
避障算法	バグアルゴリズム	614
臂转动式阶梯攀爬机器人	アーム回転式段階昇降ロボット	379
边缘	エッジ	486
编程型机器人	パログラム型ロボット	1017
编程语言	プログラミング言語	73
编程支持工具	プログラミング支援ツール	696
编码器	エンコーダ	93
编译器	コンパイラ	74
变换器	トランスデューサ	123

变形功能材料	変形機能材料	214
变压器焊钳	トランスがんだ	943
标准时间	標準時間	917
表面肌电位信号	表面筋電位信号	821
表面贴装	マウンティング	957
表示层	プレゼンテーション層	80
并联臂	パラレルアーム	240
并联杆件机械手	并列リンクマニピュレータ	235
并联管道检查机器人	パラレルリング型配管検査ロボット	1028
并联机构	パラレルメカニズム	292
并联机器人	パラレルロボット	922
并联模型	并列モデル	806
并行传输	パラレル伝送	79
波波夫超稳定定理	ポポフの超安定定理	67
波动	ウェーブ	430
波束成形	ビームフォーミング	516
波形步态	ウェーブ歩容	443
玻璃平板搬运机器人	ガラス基板搬送ロボット	972
伯德图	ボード線図	58
不稳定	不安定	55
布局规划	レイアウト計画	912
步幅	ストライド幅	431
步进电机	ステッピングモータ	136
步进直线驱动器	ステッピングリニアアクチュエータ	166
步距角误差	ステップ角度誤差	139
步数	ステップ数	138
步态	歩容	430
步行导引机器人	歩行ガイドロボット	619
步行力学模型	歩行の力学モデル	409
步行模式生成器	歩行パターンジェネレータ	839
步行训练机器人	歩行訓練用ロボット	1050
步行支持	歩行支援	892
步行支援机	歩行支援機	1050
C 采样	サンプリング	78
踩木桶机器人	たる乗りロボット	1015
参考坐标系	基準座標系	240
仓库	ストック	974
舱内机器人	船内ロボット	1077
舱外机器人	船外ロボット	1077
操纵型机器人	操縦型ロボット	1017
操作	ハンドリング	786
操作量	操作量	53
操作性	操作性	333
草莓采摘机器人	イチゴ収穫ロボット	995
侧角器	ゴニオメータ	95
侧斜	キャンバ	376
测力传感器	ロードセル	113
测速发电机	タコメータジェネレータ	95
层次结构	階層構造	741
插入装配作业	はめあい作業	556
常态	ノーマライゼーション	1046
超标量体系结构	スーパースカラ	71
超磁致伸缩微驱动器	超磁至アクチュエータ	861
超弹性材料	超弹性材料	214
超低速同步电机	超低速同期モータ	138
超感觉信息	超感觉情報	717
超镜	超鏡	733

- | | | |
|------------|------------------|-------------|
| 超冗余 | 超冗長 | 450 |
| 超声波传感器 | 超音波センサ | 118 |
| 超声波电机 | 超音波モータ | 158 |
| 超塑性变形 | 超塑性変形 | 214 |
| 超现实感 | 拡張現実感 | 1039 |
| 超小型手指力觉传感器 | 超小型指用力覚センサ | 114 |
| 超原地旋转 | 超信地旋回 | 402 |
| 车轮 | 車輪 | 15,375 |
| 车轮式倒立摆 | 車輪式倒立振子 | 394 |
| 车轮式移动机构 | 車輪移動機構 | 372 |
| 车轮支承机构 | 車輪支持機構 | 378 |
| 车门装配机器人 | ドア建付けロボット | 962 |
| 车体 | 車体 | 375 |
| 池底清扫机机器人 | ロボット型底掃除機 | 1003 |
| 尺度空间法 | 尺度空間法 | 490 |
| 尺度效应 | スケール効果 | 857 |
| 尺蠖机器人 | 尺取虫型ロボット | 1028 |
| 齿隙 | バックラッシュ | 200 |
| 冲击力向量 | 衝撃力ベクトル | 411 |
| 冲角 | 迎え角 | 400 |
| 冲压搬运系统 | プレスハンドリングシステム | 936 |
| 冲压机间搬运 | プレス間搬送 | 937 |
| 宠物机器人 | ペット型ロボット | 1015 |
| 除枝机械 | 枝打ち機械 | 999 |
| 触感技术 | タクトイルセンシング技術 | 558 |
| 触觉传感器 | 触覚センサ | 86,104 |
| 触觉反馈控制 | 触覚フィードバック制御 | 555 |
| 触觉仿真 | ハプティックシミュレーション | 715 |
| 触觉和力觉识别 | 触覚・力覚認識 | 533 |
| 触觉前馈控制 | 触覚フィードフォワード制御 | 558 |
| 触觉顺序控制 | 触覚シーケンス制御 | 555 |
| 触觉信息处理 | 触覚情報処理 | 534 |
| 触觉装置 | ハプティックデバイス | 298 |
| 穿刺支援机器人 | 穿刺支援ロボット | 1043 |
| 传递函数 | 伝達関数 | 57 |
| 传递角 | 伝達角 | 46 |
| 传递图形 | パターン伝達 | 891 |
| 传递文字 | 文字伝達 | 891 |
| 传递系数 | 伝達係数 | 47 |
| 传感器 | センサ | 85,406 |
| 传感器反馈 | センサフィードバック | 228 |
| 传感器仿真 | センサのシミュレーション | 691 |
| 传感器分层 | センサ階層化 | 815 |
| 传感器高级应用 | センサ高度応用 | 547 |
| 传感器融合 | センサフュージョン, センサ融合 | 500,547,549 |
| 传感器综合 | センサ統合 | 548 |
| 传感器坐标系 | センサ座標系 | 235 |
| 传输层 | トランスポート層 | 80 |
| 传送延迟 | 伝送遅延 | 744 |
| 串联杆件机械手 | 直列リンクマニピュレータ | 230 |
| 串联机构 | シリアル機構 | 255 |
| 串联连杆机构 | シリアルリンク機構 | 434 |
| 串联模型 | 直列モデル | 806 |
| 串行传输 | シリアル伝送 | 79 |
| 创发 | 創発 | 789 |
| 创发机器人学 | 創発ロボティクス | 797 |
| 创发系统 | 創発システム | 798 |

D

- 垂直起降型 466
- 磁传感器 129
- 磁流体驱动器 169
- 磁悬浮型 886
- 磁阻元件 130
- 粗精分析 492
- 错误自动恢复 982
- 达·芬奇 992
- 达朗贝尔原理 48
- 带变压器的机器人焊钳 943
- 带触觉传感器的手部 537
- 带电操作机器人 1024
- 带力传感器的机器人 980
- 带自重补偿机构的手臂 234
- 单侧小跑 440
- 单词语音识别装置 512
- 单点轴尖轴承型 886
- 单工模式 79
- 单腿支撑相 419
- 单位矩阵 19
- 单向控制 706
- 单压电晶片 158
- 单眼视觉 103
- 单元布局 912
- 单元分解 613
- 单元分解法 584、586
- 单足机器人 438
- 刀刃法 119
- 导电橡胶 107
- 导航机器人 1040
- 登山法 566
- 等价旋转轴 28
- 等离子弧焊 944
- 等离子切割 944
- 低阶模型 429
- 笛卡儿空间 267
- 地理信息 618
- 地面反力 410
- 地面反力中心点 411
- 地图信息 617
- 地下连续壁面施工机械 1012
- 递阶控制法 323
- 点动按钮 991
- 点焊机器人 943
- 点接触信息 534
- 电铲 999
- 电池 186
- 电磁传感器 118
- 电磁驱动器 859
- 电磁微驱动器 859
- 电磁吸盘手部 346
- 电磁转矩微驱动器 860
- 电导率传感器 127
- 电动·液压式大功率机器人 1072
- 电动机机器人 178
- 电动驱动器 136
- 电动人工肘关节 884
- 垂直離着陸型 466
- 磁気センサ視覚センサ 129
- 磁性流体アクチュエータ 169
- 磁気浮上型 886
- 磁気抵抗センサ 130
- 疎密解析 492
- エラー自己復旧 982
- ダビンチ 992
- ダランベールの原理 48
- トランス付きロボットガン 943
- 触覚センサ付きハンド 537
- 活線作業ロボット 1024
- 力センサ付きロボット 980
- 自重補償機構付きアーム 234
- ペース歩容 440
- 単語音声認識 512
- モノピット型 886
- 単方向モード 79
- 単脚支持期 419
- 単位行列 19
- ユニラテラル制御 706
- ユニモルフ 158
- 単眼視覚 103
- セルレイアウト 912
- セルデコンポジション 613
- セル分解法 584、586
- 1脚ロボット 438
- ナイフエッジ 119
- 導電性ゴム 107
- ナビゲーション用ロボット 1040
- 山登り法 566
- 等価回転軸 28
- プラズマアーク溶接 944
- プラズマ切断 944
- 低次モデル 429
- デカル空間 267
- 地理情報 618
- 床反力 410
- 床反力中心点 411
- 地図情報 617
- 地中連続壁施工機械 1012
- 階層制御法 323
- ホールド・ツー・ラン 991
- スポット溶接ロボット 943
- 点接触情報 534
- エクスカベータ 999
- バッテリー 186
- 磁気利用センサ 118
- 電磁アクチュエータ 859
- 電磁マイクロアクチュエータ 859
- 電磁吸着パット 346
- 磁気トルクアクチュエータ 860
- 導電率センサ 127
- 電動・油圧式パワーロボット 1072
- 電動ロボット 178
- 電気アクチュエータ 136
- 電動肘継手 884

电荷旋转	エレクトロローテーション	867
电机驱动器	モータドライブ	772
电缆方式	ケーブル方式	183
电流控制系统	電流制御系	773
电容式传感器	静電容量型センサ	117
电位器	ポテンショメータ	91
电液伺服马达	電気-油圧サーボモータ	150
电液压伺服机构	電気-油圧サーボ機構	179
电致伸缩应变高分子膜	電歪高分子フィルム	896
钓线	あやつり	8
调度	スケジューリング	77
调节器问题	レギュレータ問題	60
调制	符号化	78
调制解调器	モデム	79
叠加原理	重ね合せの原理	54
定位精度	位置決め精度	139, 928
定子	ステータ	137
动画电子学	アニメトロニクス	1033
动画视觉	アニメートビジョン	498
动力假腿	動力義足	883
动力学	動力学	47, 258
动力学参数	動力学パラメータ	640
动力源	動力源	178
动量矩	角運動量	47
动量	運動量	47
动态步行	動歩行	408
动态规划法	動的計画法	70
动态混合控制	動的ハイブリット制御	291
动态控制	動的制御	279
动态轮廓模型	動的輪廓モデル	487
动态设计	動的設計	330
动态特性	動特性	332
动态抓握	動的把握	847
动压悬浮型	動圧浮上型	886
动作仿真	動作シミュレーション	691
动作分析	動作分析	918
动作规划技术	動作計画技術	790
动作级语言	動作レベル言語	923
动作控制部	動作制御部	16
动作描述	動作記述	659
动作数据结构	動作データ構造	662
动作指示程序编制	動作指示プログラミング	923
独具匠心的设计	意匠デザイン	332
独立分量分析法	独立成分分析	516
独立转向方式	独立ステアリング方式	373, 930
对称矩阵	対称行列	19
对称型	対称性	706
对称抓握	対称性把握	847
对地面的自适应功能	対地適応機能	436
对话层	セッション層	80
对角方阵	対角行列	19
对角小跑	トロット歩容	440
对偶基底	双対基底	254
对偶性	双対性	258
对数倒频谱	ケプストラム	513
对说话者的适应	話者適応	516
对象级	対象物レベル	658

- | | | |
|------------------|--------------------|---------|
| 对象级语言 | 対象レベル言語 | 923 |
| 对象物形状测量 | 対象物形状計測 | 560 |
| 对应点搜索 | 対応点探索 | 492 |
| 多道编程 | マルチプログラミング | 77 |
| 多基线立体视觉 | マルチベースラインステレオ | 103,493 |
| 多孔材料 | 多孔質材料 | 210 |
| 多模态界面 | マルチモーダルインタフェース | 523 |
| 多模态媒体 | マルチモーダルメディア | 507 |
| 多维触觉 | 多次元触觉 | 558 |
| 多维图像处理 | 多次元画像処理 | 491 |
| 多线程结构 | マルチスレッディング | 72 |
| 多智能体 | マルチエージェント | 791 |
| 多自由度机器人 | 多自由度ロボット | 693 |
| 多足机器人 | 多脚ロボット | 430 |
| E 厄阵 | エルミート行列 | 22 |
| 二次电池 | 2次電池 | 188 |
| 二维单元机械 | 2次元ユニット機械 | 785 |
| 二维分布载荷 | 2次元分布荷重 | 536 |
| 二维图像处理 | 2次元画像処理 | 482 |
| 二维稳定抓握模型 | 2次元安定把握モデル | 364 |
| 二值图像 | 2値画像 | 488 |
| F 发动机供电方式 | エンジン方式 | 185 |
| 伐木机械 | 伐倒機械 | 999 |
| 法线向量 | 法線ベクトル | 241 |
| 翻倒稳定余量 | 転倒安定余裕 | 437 |
| 反传学习算法 | バックプロパゲーション | 579 |
| 反电动势常数 | 逆起電力定数 | 140 |
| 反电动势 | 逆起電力 | 140 |
| 反复学习控制 | 繰返し学習制御, 遺伝的アルゴリズム | 318 |
| 反馈控制 | フィードバック制御 | 52,839 |
| 反应系统 | リアクティブシステム | 781 |
| 泛在化 | ユビキタス化 | 726 |
| 泛在自主体 | ユビキタスオートノミー | 735 |
| 范数 | ノルム | 23 |
| 方法工程 | メソッドエンジニアリング | 901 |
| 方块图 | ブロック線図 | 53 |
| 方框匹配 | ブロックマッチング | 497 |
| 方位传感器 | 方位センサ | 90 |
| 方向向量 | 方向ベクトル | 241 |
| 方阵 | 正方行列 | 19 |
| 防灾机器人样机 | 防災ロボット実証機 | 1068 |
| 仿人 | ヒューマノイド | 844 |
| 仿射子空间 | アフィン部分空間 | 31 |
| 仿生机构学会 | バイオメカニズム学会 | 9 |
| 仿生机器人 | バイオロボティクス | 881 |
| 仿形控制 | ならい制御 | 556 |
| 仿真工具 | シミュレーションツール | 694 |
| 仿真技术 | シミュレーション技術 | 671 |
| 仿真器 | シミュレータ | 297 |
| 放大器 | アンプ | 192 |
| 飞艇 | 飛行船 | 467 |
| 飞行时间法 | 飛行時間法 | 120 |
| 非感知传感器 | センサレスセンサ | 941 |
| 非接触充电法 | 非接触充電法 | 184 |
| 非完整系统的最优控制 | 非ホロノミック系の最適制御 | 317 |
| 非线性控制 | 非線性制御 | 67,321 |
| 非语言交流 | 非言語コミュニケーション | 945 |

- | | | |
|--------------------|-------------------------|----------|
| 非语音通信 | ノンバーバルコミュニケーション | 523 |
| 非抓握操作 | グラスプレスマニピュレーション | 355 |
| 分布参数模型 | 分布定数モデル | 305 |
| 分布参数系统 | 分布定数系 | 305 |
| 分布感觉智能网络设备 | 分散感觉知能化ネットワークデバイス | 796 |
| 分布感知 | 分散センシング | 550 |
| 分布规划 | 分散プランニング | 790 |
| 分布控制系统 | 分散制御系 | 771 |
| 分布式(阵列型)传感器 | 分布式(マトリックス型)センサ | 107 |
| 分布式机器人系统 | 分散型ロボットシステム | 783 |
| 分布视觉 | 分散视觉 | 792 |
| 分布系统 | 分散システム | 783 |
| 分布协调控制算法 | 分散協調制御アルゴリズム | 786 |
| 分叉搜索法 | 枝刈り探索法 | 70 |
| 分段特征 | 分節の特徴 | 517 |
| 分级控制 | 階層の制御 | 553 |
| 分解加速度控制 | 分解加速度制御 | 246 |
| 分解速度 | 分解速度 | 246 |
| 分解速度控制 | 分解速度制御 | 274 |
| 分散实时处理 | 分散実時間処理 | 78 |
| 分析合成方式 | 分析合成方式 | 518 |
| 服务器/客户端模型 | サーバ・クライアントモデル | 778 |
| 福利工程学 | 福祉工学 | 1046 |
| 福利机器 | 福祉機器 | 374 |
| 福利机器人 | 福祉ロボット、福祉用ロボット | 1044 |
| 福利设备 | 福祉機器 | 1047 |
| 辅助装具 | 補装具 | 1047 |
| 复合材料 | 複合材料 | 210, 222 |
| 复合故障树形分析 | 複合 FTA | 333 |
| 复数矩阵 | 複素行列 | 22 |
| 复向量空间 | 複素ベクトル空間 | 23 |
| 傅里叶变换 | フーリエ変換 | 485 |
| 腹腔镜手术内窥镜操作机械手系统 | 腹腔鏡手術下内視鏡操作用マニピュレータシステム | 1041 |
| G 改进 D-H 方法 | 修正 D-H 記法 | 263 |
| 干扰观测器 | 外乱オブザーバ | 155 |
| 干涉回避 | 干涉回避 | 982 |
| 干涉检查 | 干涉検出 | 687 |
| 杆件设计 | リンクの設計 | 327 |
| 杆件坐标系 | リンク座標系 | 235 |
| 杆体 | 桿体 | 99 |
| 感觉-行动系统的综合模型 | 感觉・行動系の統合処理モデル | 826 |
| 感性和功能评价系统 | 感性・官能評価システム | 507 |
| 刚体力学 | 剛体の力学 | 45 |
| 刚体模型 | 剛体モデル | 675 |
| 刚体运动方程式 | 剛体の運動方程式 | 48 |
| 刚体运动 | 剛体の運動 | 42, 251 |
| 刚性材料 | 剛性材料 | 212 |
| 刚性控制 | スティフネス制御, 剛性制御 | 287, 360 |
| 钢构件耐火材料喷涂机器人 | 鉄骨耐火被覆吹付けロボット | 1006 |
| 钢架几何精度测量系统 | 鉄骨柱建方精度計測システム | 1008 |
| 钢丝绳吊挂式舱内机器人 | ワイヤ吊り型船内ロボット | 1079 |
| 高分子凝胶 | 高分子ゲル | 896 |
| 高分子凝胶驱动器 | 高分子ゲルアクチュエータ | 173 |
| 高分子驱动器 | 高分子アクチュエータ | 172 |
| 高分子微驱动器 | 高分子アクチュエータ | 861 |
| 高刚性切割专用机器人 | 高機能切断専用ロボット | 945 |
| 高强度轻质材料 | 高強度軽量材料 | 210 |

- | | | |
|------------|---------------------|------------|
| 高跷双足步行机器人 | 竹馬型2脚歩行ロボット | 1015 |
| 高斯函数 | ガウス関数 | 486 |
| 高速手臂 | 高速アーム | 297 |
| 高专 RoboCoN | 高専ロボコン | 1094 |
| 哥氏加速度 | コリオリ加速度 | 42,242 |
| 哥氏力 | コリオリ力 | 260 |
| 格子投影法 | 格子投影法 | 121 |
| 隔行 | インタレース | 482 |
| 给料器 | パーツフィーダ | 938 |
| 根轨迹 | ベクトル軌跡 | 59 |
| 工厂自动化 | ファクトリーオートメーション | 14 |
| 工具型末端执行器 | 工具型エンドエフェクタ | 345 |
| 工序分析 | 工程分析 | 915 |
| 工序 | 工程 | 909 |
| 工序设计 | 工程設計 | 909 |
| 工业操作机器人 | 産業用マニピュレーティングロボット | 5,17 |
| 工业工程 | インダストリアルエンジニアリング | 901 |
| 工业机器人 | 産業用ロボット | 5,9,11,922 |
| 工业机器人的安全性 | 産業ロボットの安全性 | 808 |
| 工业机器人的分类 | 産業ロボットの分類 | 627 |
| 工业机器人的功能 | 産業ロボットの機能 | 648 |
| 工业机器人的机构 | 産業ロボットの機構 | 628 |
| 工业机器人 | 工業用ロボット | 13 |
| 工业机器人控制器 | 産業ロボットのコントローラ | 648 |
| 工业用无人直升机 | 産業用無人ヘリコプタ | 466 |
| 工业智能机器人 | 産業用知能ロボット | 980 |
| 工作空间 | 作業領域 | 250 |
| 工作取样 | ワークサンプリング | 917 |
| 功率比 | パワーレート | 145 |
| 功率放大器 | パワーアンプ | 193,194 |
| 功率谱包络法 | パワースペクトル包絡法 | 522 |
| 功能创发 | 機能創発 | 798 |
| 功能评价 | 機能評価 | 332 |
| 供料机器人 | 材料供給ロボット | 933 |
| 共存型机器人 | 共存型ロボット | 814 |
| 共存作业 | 共存システム | 814 |
| 共振峰频率 | フォルマント周波数 | 517 |
| 共振角频率 | 共振周波数 | 59 |
| 构件 | 節 | 17 |
| 构形空间 | コンフィギュレーション空間, 配置空間 | 33,613 |
| 古典控制理论 | 古典制御理論 | 65 |
| 骨骼肌肉的可变黏弹性 | 骨骼筋の可变粘弾性 | 818 |
| 骨骼结构 | 骨骼構造 | 765 |
| 骨架法 | スケルトン法 | 584 |
| 鼓形车轮机器人 | たる形車輪ロボット | 374 |
| 固定机翼型 | 固定翼型 | 465 |
| 固定路径引导方式 | 固定経路誘導方式 | 929 |
| 固定顺序操作机 | 固定シーケンスマニピュレータ | 13 |
| 故障分析 | 故障解析 | 805 |
| 故障率 | 故障率 | 805 |
| 关节 | ジョイント, 関節 | 17,204,230 |
| 关节角传感器 | 関節角センサ | 94 |
| 关节角直线插补 | 関節角直線補間 | 660 |
| 关节可动范围 | 関節可動域 | 1046 |
| 关节可动范围运动 | 関節可動域運動 | 1049 |
| 关节空间 | 関節空間 | 32 |
| 关节驱动力 | 関節駆動力 | 256 |

关节伺服	関節サーボ	270
关节型机器人	関節ロボット	232,922
关联矩阵	接続行列	38
观测器法	オブザーバ	61
管道内壁焊缝检查机器人	配管内面溶接部検査ロボット	1026
管道内壁遥控检查维护机器人	遠隔配管内点検・修理ロボット	1026
管道内部清扫机器人	配管内部清掃ロボット	1026
管道维护机器人	配管メンテナンスロボット	1024
管内多用途机器人	管内マルチロボット	1026
管内焊接机器人	管内溶接ロボット	1026
管内移动机器人	管内走行ロボット	872
惯性传感器	慣性センサ	397
惯性导航系统	慣性航法装置	464
惯性矩	慣性モーメント	48,535
惯性张量	慣性テンソル	48,262
惯性主轴	慣性主軸	48
光波导板型触觉传感器	光導波板型触覚センサ	536
光电二极管	ホトダイオード	100
光电开关	ホトインタラプタ	91
光电子倍增管	光電子増倍管	101
光接受容器	光受容器	99
光接受装置	受光デバイス	100
光缆敷设机器人	光ファイバケーブル敷設ロボット	1027
光流场	オブティカルフロー	496
光切断法	光切断法	103,121
光束投射法	光束投影法	120
光微驱动器	光アクチュエータ	861
光线追踪法	レイトレーシング, 光線追跡	690
光学测距法	光学距離検出法	118
光学距离传感器	光学距離センサ	124
光学陀螺仪	光学ジャイロ	98
光致伸缩元件	光歪素子	861
广播	ブロードキャスト	778
广义逆矩阵	擬似逆行列	20
广义沃洛诺伊图	一般化ボロノイグラフ	614
归类结构	サブサンプシジョンアーキテクチャ	780
规划	プランニング	564
规则步态	レギュラー歩容	431
轨道	軌道	41
轨道机器人	軌道上ロボット	1077
轨迹控制	軌道制御	276
滚动摩擦	転がり抵抗	389
滚动轴承	転がり軸受	204
滚珠衬套	ボールブシュ	207
滚珠丝杠	ボールねじ	200
锅炉管道检查机器人	ボイラ配管検査ロボット	1027
国际残障者分类	国際障害者分類	1046
过渡响应评价	過渡応答評価	330
过热重热器管道检查机器人	過・再熱器管検査ロボット	1026
哈密顿-雅可比理论	ハミルトン-ヤコビ理論	315
哈密顿原理	ハミルトンの原理	50,301
海豹机器人	アザラシ型ロボット	1016
海底石油生产支援机器人	海底石油生産支援ロボット	1067
海豚形水下机器人	イルカ形ロボット	458
海洋机器人	海中用ロボット	1072
焊接	溶接	939
航位推算	デッドレコニング	602

- | | | |
|-------------------|------------------|---------|
| 合成型全方位车轮 | 合成型全方向車輪 | 377 |
| 核磁共振图像 | 機能的磁気共鳴画像 | 1039 |
| 核发电设施作业机器人 | 原子力発電施設作業ロボット | 1067 |
| 核反应堆容器检查机器人 | 原子炉容器検査ロボット | 1069 |
| 核能机器人 | 原子力ロボット | 1067 |
| 赫尔维茨(A. Hurwitz)法 | フルビッツの方法 | 60 |
| 横摆运动功能 | ウィービング機能 | 638 |
| 横向力 | 横力 | 390 |
| 横向面 | 前頭面 | 403 |
| 横型搜索 | 横型探索 | 566 |
| 红外温度传感器 | 赤外温度センサ | 129 |
| 红外线图像 | 赤外線イメージ | 101 |
| 互补融合 | 相補的融合 | 500 |
| 互锁 | インタロック | 990 |
| 护理支援机器人 | 介護支援ロボット | 1049 |
| 护助 | 介助 | 1047 |
| 滑动信息 | すべり情報 | 534 |
| 滑动轴承 | すべり軸受 | 204 |
| 滑环方式 | スリップリング | 183 |
| 滑觉 | すべり覚 | 556 |
| 滑觉传感器 | すべり覚センサ | 87,106 |
| 化学电池 | 化学電池 | 187 |
| 环境地图 | 環境地図 | 610,611 |
| 环境定义功能 | 環境定義機能 | 661 |
| 环境识别系统 | 管内自走環境認識システム | 1028 |
| 环境型机器人 | 環境型ロボット | 794 |
| 环境智能化 | 環境知能化 | 793 |
| 缓和碰撞冲击力 | 衝撃力緩和 | 411 |
| 换腿步态 | 踏換え歩容 | 442 |
| 黄瓜采摘机器人 | キュウリ収穫ロボット | 996 |
| 晃动 | ジッタ | 76 |
| 灰度 | シェーディング | 482 |
| 会话机器人 | 対話ロボット, 会話ロボット | 512,529 |
| 会话语音识别 | 会話音声認識 | 525 |
| 混合控制 | ハイブリッド制御 | 980 |
| 混合灵敏度 | 混合感度設計 | 307 |
| 混合式移动机构 | ハイブリッド式移動機構 | 447 |
| 混合型步进电机 | ハイブリッド型ステッピングモータ | 136 |
| 混凝土地面平整机器人 | コンクリート床仕上げロボット | 1008 |
| 活体相容性 | 生体適合性 | 890 |
| 活体组织相容性 | 生体組織適合性 | 892 |
| 伙伴型机器人 | パートナー型ロボット | 1015 |
| 霍尔元件 | ホール素子 | 130 |
| 霍夫变换 | ハフ変換 | 487 |
| 机构参数 | 機構パラメータ | 640 |
| 机构设计的支持工具 | 機構設計支援ツール | 694 |
| 机构学 | 機構学 | 17,381 |
| 机关 | からくり | 8 |
| 机能障碍 | 機能障害 | 1046 |
| 机能自立度评价法 | 機能的自立度評価法 | 1048 |
| 机器人 | ロボット | 3 |
| 机器人创造国际比赛大会 | ロボット創造国際競技会 | 1094 |
| 机器人大奖赛 | ロボットグランプリ | 1094 |
| 机器人的定义 | ロボットの定義 | 3 |
| 机器人房间 | ロボティックルーム | 793 |
| 机器人技术融合型 | ロボット技術融合型 | 710 |
| 机器人控制系统 | ロボット制御システム | 645 |

机器人赛事	ロボット競技会	1092
机器人视觉	ロボットビジョン	477
机器人网络接口	ロボットネットワークインタフェース	754
机器人系统	ロボットシステム	627
机器人相扑大会	ロボット相撲大会	1094
机器人学三原则	ロボット3原則(アシモフの)	4
机器人语言	ロボット言語	656
机器视觉	マシンビジョン	503
机械加工单元	機械加工セル	938
机械加工线	機械加工ライン	938
机械式主从机械手	機械マスタ・スレーブマニピュレータ	708
机械手	メカニカルハンド, マニピュレータ	15,346
机械手的运动学模型	マニピュレータの運動モデル	639
机械主义	機械主義	810
机械阻抗	機械インピーダンス	818
肌球蛋白	アクチン	895
肌肉骨骼系统	筋骨格系	818
基本参数	ベースパラメータ	683
基本动作要素符号	サブトリック記号	918
基础坐标系	ベース座標系	17
基带传输方式	ベースバンド伝送方式	78
基底参数	基底パラメータ	310
基底向量	基底ベクトル	23
基平面	台平面	30
基音频率模式模型	基本周波数パターンモデル	519
基于传感器的导航	センサベーストナビゲーション	614
基于传感器引导	センサベーストアプローチ	610
基于法则的推理	ルールベース推論	548
基于模型的导航	モデルベーストナビゲーション	613
基于模型的机器人学	モデルベーストロボティクス	693
基于模型引导	モデルベーストアプローチ	610
基准步态	基準歩容	431
基准测试程序	ベンチマークテスト	68
基准坐标系	基準座標系	27
基座坐标系	ベース座標系	235
激光测长仪	レーザ測長器	120
激光测距法	レーザ測距法	104
激光焊接・切割	レーザ溶接・切断	944
激光微操作	レーザマイクロマニピュレーション	869
极大极小法	ミニマックス法	568
极大值原理	最大原理	313
极点	極	60
极点配置问题	極配置問題	61
极数	極数	138
极限环境作业机器人	極限環境作業ロボット	1066
极坐标型机器人	極座標ロボット	232
集中参数系统	集中定数系	306
集中控制系统	集中制御系	771
集中式传感器	集中型センサ	104
几何算法	幾何アルゴリズム	31
挤奶机器人	搾乳ロボット	998
计算机结构	計算機アーキテクチャ	70
计算机嵌入型	計算機介在型	709
计算机外科	コンピュータ外科	1039
计算机语言	計算機言語	73
计算转矩法	計算トルク法	279
技术社会论	技術社会論	810

既約分解	既約分解	62
伽利略-牛頓力学	ガリレイ-ニュートン力学	47
加速度瞬心	加速度極	44
加速度微传感器	加速度センサ	862
加速阻力	加速抵抗	390
假臂	義手	883
假腿步行模拟器	義足步行シミュレータ	883
假腿	義足	881
假肢	義肢	1050
嫁接机器人	接ぎ木ロボット	997
间接教学法	間接ティーチ法	632
间接作业支援机器人	間接作業支援ロボット	1049
监管控制	管理制御	724
监视	ポーリング, 監視	760
检测机器人系统	検査ロボットシステム	978
减速器驱动型 4 指手	減速機駆動型 4 指ハンド	847
减压阀	減圧弁	181
建材搬运机器人	建材ハンドリングロボット	1008
建材自动搬运系统	資材自動搬送システム	1008
建模	モデリング	54
建筑机器人	建築用ロボット	1005
渐开线齿廓	インボリュート	199
腱驱动型 4 指手	腱駆動型 4 指ハンド	847
键合	ボンディング	964
降低风险的步骤	リスタ低減手順	813
交叉滚子直线导轨	クロスローラガイド	207
交叉滚子轴承	クロスローラベアリング	206
交叉	交差	580
交调失真	クロストーク	88
交互攀缘形机器人	ブラキエーションロボット	453
浇注机器人	給湯ロボット	933
胶囊状内窥镜	カプセル型内視鏡	874
脚本语言	スクリプト言語	74
脚部机构	脚先機構	435
脚轮	キャスト	378
脚轮型驱动机构	キャスト型駆動輪機構	388
脚掌机构	足平機構	405
接触点的检测算法	接触点検出アルゴリズム	559
接触觉传感器	接触覚センサ	104
接触模型	接触モデル	349
接触式传感器	接触型センサ	117
接触型知觉	ハプティクス知覚	539
接触与碰撞的分析	接触、衝突の解析	675
接近觉传感器	近接覚センサ	88, 117
接近觉	近接覚	556
节省布线型手臂	省配线型アーム	332
节省自由度的腿部机构	省自由度脚機構	433
洁净间	クリーンルーム	969
结构材料	構造材料	208
结构透明度	機構透明度	705
颌颞肌	拮抗筋	407
颌颞驱动式双足机器人	拮抗駆動式 2 脚ロボット	407
截止时间	デッドライン	76
解调	復号化	78
解耦控制理论	非干渉制御理論	280
解释器	インタプリタ	74
金枪鱼形机器人	マグロ形水中ロボット	458

- | | | |
|----------|-------------------|---------|
| 紧急停止 | 緊急停止 | 758 |
| 进程 | プロセス | 79 |
| 进化规划 | 進化的プログラミング | 580 |
| 进化计算 | 進化的計算 | 577 |
| 近似单元分割法 | 近似セル分割法 | 590 |
| 经济性评价 | 經濟性評価 | 915 |
| 晶片搬运机器人 | ウェーハ搬送ロボット | 970 |
| 精度与分辨率 | 精度と分解能 | 116 |
| 精密等离子切割 | ファインプラズマ切断 | 945 |
| 精密配合作业 | 精密はめあい作業 | 980 |
| 精神慰藉机器人 | メンタルコミットメントロボット | 1053 |
| 竞争融合 | 競合の融合 | 500 |
| 静电膜驱动器 | 静電フィルムアクチュエータ | 897 |
| 静电驱动器 | 静電アクチュエータ | 165 |
| 静电人造硅橡胶 | 静電シリコンエラストマー | 896 |
| 静电微驱动器 | 静電アクチュエータ | 858 |
| 静力学 | 静力学 | 45 |
| 静态抓握 | 静的把握 | 847 |
| 救援机器人比赛 | レスキューロボットコンテスト | 1063 |
| 救助机器人 | 救助ロボット | 1058 |
| 局部反馈 | 局所フィードバック | 428 |
| 局部路径设计 | 局所経路設計 | 397 |
| 局部坐标系 | 局所座標系 | 33 |
| 矩量代数 | モーメント代数 | 296 |
| 矩阵的迹 | トレース | 22 |
| 距离变换 | ディスタンストランスフォーム | 614 |
| 距离传感器 | 距離センサ | 88, 122 |
| 距离图像处理 | 距離画像処理 | 494 |
| 卷积积分 | たたみ込み積分 | 55 |
| 绝对式编码器 | アブソリュート型エンコーダ | 93 |
| 卡尔曼滤波器 | カルマンフィルタ | 548 |
| 卡片式记录法 | カルテ記載法 | 1048 |
| 开放式控制器 | オープンコントローラ | 651 |
| 开放式网络接口 | オープンネットワークインタフェース | 754 |
| 开放性 | オープン化 | 651 |
| 开环控制法 | 開ループ制御 | 313 |
| 开环控制 | 開ループ制御 | 52 |
| 开口问题 | 開口問題 | 497 |
| 开式链机械手 | シリアルマニピュレータ | 227 |
| 铠装 | エグゾスケルトン | 1053 |
| 康复 | リハビリテーション | 1047 |
| 康复医学 | リハビリテーション医学 | 1048 |
| 康复支援机器人 | リハビリテーション支援ロボット | 1049 |
| 抗弯刚度 | 曲げこわさ | 765 |
| 抗振材料 | 防振材料 | 213 |
| 可编程逻辑控制器 | プログラムロジックコントローラ | 665 |
| 可变结构控制 | 可変構造制御 | 322 |
| 可变形杆件系统 | 構造可変リンク系 | 674 |
| 可操作度 | 可操作度 | 36 |
| 可操作性 | 可操作性 | 22 |
| 可观測性 | 可観測性 | 57 |
| 可见图 | ビジビリティグラフ | 613 |
| 可靠性评价 | 信頼性評価 | 333 |
| 可靠性 | 信頼性 | 804 |
| 可控性 | 可制御性 | 56 |
| 可视图 | 可视グラフ | 690 |
| 可维护性 | 保全性 | 804 |

- | | | |
|------------------|-----------------|---------------|
| 可用性 | アベイラビリティ | 804 |
| 可重构机器人 | 構造可変ロボット | 784 |
| 可重构履带式智能机器人 | 形状可変クローラ型知能ロボット | 1068 |
| 空间编码测距仪 | 空間コード化レンジファインダ | 103 |
| 空间共享系统 | 空間共有システム | 733 |
| 空间挂钩悬浮控制 | スカイフックサスペンション制御 | 445 |
| 空间机器人 | 宇宙ロボット | 1077 |
| 空间滤波 | 空間フィルタリング | 484 |
| 空气压缩机 | 空気圧縮機 | 181 |
| 空气阻力 | 空気抵抗 | 390 |
| 空中机器人 | 空中ロボット | 459 |
| 控制规则 | 制御則 | 53 |
| 控制量 | 制御量 | 53 |
| 控制论 | サイバネティクス | 9 |
| 控制器 | コントローラ, 制御器 | 53, 645 |
| 控制系统设计 | 制御系設計 | 770 |
| 库仑力 | クーロン力 | 858 |
| 库仑摩擦 | クーロン摩擦 | 260 |
| 宽带传输方式 | ブロードバンド伝送方式 | 79 |
| 框架问题 | フレーム問題 | 568 |
| 扩展现实感 | 拡張現実感 | 732 |
| L 拉格朗日乘数 | ラグランジュ乗数 | 269 |
| 拉格朗日法 | ラグランジュ法 | 258 |
| 拉格朗日函数 | ラグランジュ関数 | 50 |
| 拉格朗日运动方程式 | ラグランジュの運動方程式 | 50 |
| 拉普拉斯变换 | ラプラス変換 | 57 |
| 拉普拉斯逆变换 | 逆ラプラス変換 | 57 |
| 拉普拉斯展开式 | ラプラスの展開公式 | 19 |
| 拉伸反射系统 | 伸張反射系 | 818 |
| 劳动安全卫生规范 | 労働安全衛生規則 | 988 |
| 劳思(E. J. Routh)法 | ラウスの方法 | 60 |
| 老龄工程学 | 加齢工学 | 1046 |
| 冷凝器清扫检查机器人 | 復水器清掃検査ロボット | 1026 |
| 离线编程 | オフラインプログラミング | 633 |
| 离线程序编制 | オフラインプログラミング | 923 |
| 离线仿真 | オフラインシミュレーション | 691 |
| 离心力 | 遠心力 | 260 |
| 李代数 | リー代数 | 251 |
| 李群 | リー群 | 252 |
| 李雅普诺夫稳定定理 | リヤプノフの安定定理 | 67 |
| 李亚普诺夫方法 | リアプノフの方法 | 307 |
| 李亚普诺夫方法 | リヤプノフの方法 | 311 |
| 里程计法 | オドメトリ | 602 |
| 锂离子电池 | リチウムオン | 189 |
| 力-力矩检测原理 | 力・モーメント検出原理 | 113 |
| 力/力矩传感器 | 力/トルクセンサ | 17 |
| 力度把握 | パワーグラスプ | 355 |
| 力反馈型 | 力帰還型 | 706 |
| 力反射型 | 力逆送型 | 706 |
| 力封闭原理 | フォースクロージャの原理 | 293 |
| 力觉传感器 | 力覚センサ, 力覚センサオン | 86, 112 |
| 力觉反馈控制 | 力覚フィードバック制御 | 558 |
| 力觉信息识别 | 力覚情報認識 | 542 |
| 力控制 | 力制御 | 117, 866 |
| 力螺旋 | レンチ | 350 |
| 立体视觉 | ステレオ, ステレオ视觉 | 103, 491, 497 |
| 例外处理系统 | 例外処理系 | 648 |

- | | | |
|-------------------|--------------|----------|
| 隶属函数 | メンバシップ関数 | 577 |
| 连杆机构 | リンク機構 | 203, 230 |
| 连接发声 | 連結発声 | 525 |
| 连接图 | 連結グラフ | 586 |
| 连接型多轮移动机器人 | 連結型多車輪移動ロボット | 450 |
| 连续二次规划法 | 逐次2次計画法 | 843 |
| 连续发声 | 連続発声 | 525 |
| 连续映射 | 連続写像 | 33 |
| 连续语音识别装置 | 連続音声認識 | 512 |
| 两腿支撑相 | 両脚支持期 | 419 |
| 量化 | 量子化 | 78 |
| 料库选取 | ピンピッキング | 982 |
| 临场感操纵型机器人系统 | 遠隔臨場システム | 717 |
| 临场感技术 | テレプレゼンス | 717 |
| 临界角法 | 臨界角法 | 119 |
| 灵敏度函数 | 感度関数 | 280 |
| 灵巧图像传感器 | スマート画像センサ | 481 |
| 零力矩点 | ゼロモーメントポイント | 411 |
| 领导者・跟随者型 | リータ・フォロワタイプ | 787 |
| 令牌 | トークン | 779 |
| 令牌传递 | トークン・パッシング方式 | 779 |
| 流水线技术 | パイプライン | 71 |
| 流形 | 多様体 | 32 |
| 六轴力觉传感器 | 6軸力覚センサ | 116 |
| 六足机器人 | 6脚ロボット | 443 |
| 龙格-库塔-吉尔 | リング・クッタ・ギル法 | 266 |
| 楼宇自动施工系统 | ビル自動化施工システム | 1009 |
| 鲁棒辨识 | ロバスト同定 | 67 |
| 鲁棒控制 | ロバスト制御 | 155 |
| 鲁棒控制理论 | ロバスト制御理論 | 65 |
| 鲁棒稳定性 | ロバスト安定性 | 22 |
| 鲁棒性 | ロバスト性 | 320 |
| 录音编辑合成方式 | 録音編集合成方式 | 518 |
| 路标 | ランドマーク | 602 |
| 路径跟踪 | 経路追従 | 758 |
| 路径规划 | 経路計画 | 36 |
| 路径 | 経路 | 41 |
| 路径图法 | ロードマップ法 | 584, 591 |
| 履带 | クローラ | 15 |
| 履带机构 | クローラ機構 | 400 |
| 履带式机器人 | クローラ型ロボット | 1062 |
| 履带式移动机构 | クローラ式移動機構 | 399 |
| 轮式机器人 | 車輪型ロボット | 1062 |
| 轮腿式机器人 | 脚車輪型ロボット | 448 |
| 轮腿式双足移动系统 | 脚車輪2脚移動システム | 449 |
| 螺钉检查机器人 | ねじ検査ロボット | 962 |
| 螺钉紧固机器人 | ねじ締めロボット | 961 |
| 螺旋理论 | スクリュエ理論 | 350 |
| 螺旋锥齿轮 | すぐ歯かさ歯車 | 199 |
| M 马尔可夫决策过程 | マルコフ決定過程 | 582 |
| 码垛机器人 | パレタイジングロボット | 933 |
| 迈耳尺度 | メル尺度 | 513 |
| 麦斯纳氏小体 | マイスネル小体 | 104 |
| 脉冲发生器 | パルスジェネレータ | 93 |
| 脉冲输入 | インパルス入力 | 54 |
| 脉冲响应 | インパルス応答 | 55 |
| 脉动转矩 | 脈動トルク | 139 |

脉宽调制方法	パルス幅制御法	141
慢走歩态	アンブル歩容	440
盲文阅读器	オプタコン	891
酶传感器	酵素センサ	130
美克耳氏触觉细胞	メルケル触覚細胞	104
密封材料涂布机器人系统	シーリング材塗布ロボットシステム	949
免提语音识别	ハンズフリー音声認識	516
免疫传感器	免疫センサ	130
面向目标的语言	オブジェクト指向言語	74
面向人工智能语言	人工知能向き言語	74
模版匹配	テンプレートマッチング	491
模仿学习	模倣学習	570, 575
模糊控制	ファジィ制御	577
模糊理论	ファジィ理論	577
模糊推理	ファジィ推論	549
模拟驾驶	シミュレーションライド	1018
模拟信号	アナログ信号	78
模数	モジュール	199
模态法	モード法	298
模型参考自适应控制系统	モデル規範型適応制御系	309
模型规范型自适应控制系统	モデル規範型適応制御系	66
摩擦	摩擦	389
摩擦锥	摩擦円錐	351
末端约束	手先拘束	269
末端执行器	エンドエフェクタ	15, 344, 867, 928
末端执行器坐标系	エンドエフェクタ座標系	17
莫尔条纹法	モアレ法	104
目标轨迹生成	目標軌道生成	277
目标函数	目的関数	313
目标值	目標値	53
幕帘方式	カーテン方式	183
N 纳米操作	ナノマニピュレーション	875
纳米碳管	カーボンナノチューブ	874
钠硫化电池	ナトリウム硫黄電池	189
奈奎斯特稳定性判定法	ナイキストの安定判別方法	64
耐高放射线机器人	耐高放射線対応ロボット	1070
耐环境型机器人	耐環境型ロボット	1070
脑穿刺机械手	脳穿刺マニピュレータ	1043
脑磁区测量	脳磁界計測	1039
内壁自动补强焊接机器人	内面自動補強溶接ロボット	1026
内部 LAN	体内 LAN	747
内齿轮	内歯車	199
内传感器	内界(計測)センサ	90
内骨骼结构手臂	内骨格構造型アーム	846
内积	内積	25
内窥镜操作手	内視鏡マニピュレータ	1041
内力	内力	357
能动度	可動度	356
能力低下	能力低下	1046
拟人机器人	ヒューマノイド	5, 9
逆动力学模型	逆動力学モデル	258
逆动力学	逆動力学	261
逆动力学问题	逆動力学問題	258
逆矩阵	逆行列	19
逆运动学	逆運動学	246
逆坐标变换	逆座標変換	246
黏弹性模型	粘弾性モデル	557

O

P

Q

- 黏性摩擦系数 140
- 镍镉蓄电池 188
- 镍氢电池 188
- 牛顿-欧拉法 261
- 欧几里得范数 20
- 欧拉-珀安卡勒公式 687
- 欧拉参数 273
- 欧拉参数化 63
- 欧拉法 675
- 欧拉方程式 48
- 欧拉角 43
- 欧氏空间 32
- 耦合驱动 433
- 爬行步态 441
- 帕其尼氏小体 104
- 排泄支援系统 1091
- 排序问题 69
- 跑步 409
- 配电作业 1023
- 配合作业 980
- 配准 1040
- 喷浆机器人 1012
- 喷水机器人 1057
- 喷涂机器人 933, 946
- 喷嘴挡板伺服阀 148
- 膨胀手爪 349
- 偏差校正 594, 597
- 频率调制 79
- 频率响应评价 330
- 频域传递函数 57
- 平顶型触觉传感器 537
- 平衡觉传感器 129
- 平均故障间运行时间 804
- 平均着地压强 402
- 平面模型 404
- 平面型 DD 电机 147
- 平面运动的运动学 43
- 平行四边形连杆机构方式 234
- 平移运动 231
- 评价函数 313
- 坡度阻力 390
- 匍匐步态 440
- 齐次变换 27, 237
- 齐次坐标变换 687
- 齐次坐标 27
- 齐次坐标系 237
- 奇异点 231
- 奇异值分解法 250
- 奇异值 22
- 奇异姿态 36
- 气动驱动器 151
- 气动蛇形机器人 451
- 气动手指 164
- 气缸 152
- 气体识别传感器 128
- 气吸手爪 348
- 气压驱动机器人 180
- 粘性摩擦系数 140
- ニッケルカドミウム 188
- ニッケル水素電池 188
- ニュートン・オイラー法 261
- ユークリッドノルム 20
- オイラーポアンカレの式 687
- オイラーパラメータ 273
- ユーラパラメトリゼーション 63
- オイラー法 675
- オイラー方程式 48
- オイラー角 43
- ユークリッド空間 32
- 干涉驱动 433
- クロール歩容 441
- パチニ小体 104
- 排泄支援システム 1091
- ソーティング問題 69
- 走行 409
- 配電作業 1023
- はめあい作業 980
- 対応づけ 1040
- コンクリート吹付けロボット 1012
- 放水ロボット 1057
- スプレーロボット, 塗装用ロボット 933, 946
- ノズルフラップ方式サーボ弁 148
- 膨縮グリップ 349
- エラーリカバリ 594, 597
- 周波数変調 79
- 周波数応答評価 330
- 周波数伝達関数 57
- テーブルトップ型触覚センサ 537
- 平衡覚センサ 129
- 故障間動作時間 804
- 平均接地圧 402
- 平面モデル 404
- 平面型 DD 用モータ 147
- 平面運動の運動学 43
- 平行四辺形リンク(パンタグラフ)方式 234
- 並進運動 231
- 評価関数 313
- こう配抵抗 390
- クリープ歩容 440
- 同次変換 27, 237
- 同次座標変換 687
- 同次座標 27
- 同次座標系 237
- 特異点 231
- 特異値分解 250
- 特異値 22
- 特異姿勢 36
- 空気圧アクチュエータ 151
- 空圧へび型ロボット 451
- ニューマチックフィンガ 164
- 空気圧シリンドラ 152
- ガス認識センサ 128
- ニューマチックグリップ 348
- 空気圧駆動ロボット 180

- | | | |
|---------------|----------------------------|--------------------|
| 启发的知识 | 発見の知識 | 564 |
| 铅蓄电池 | 鉛蓄電池 | 188 |
| 前馈控制 | フィードフォワード制御 | 52 |
| 前轮转向方式 | 前輪ステアリング方式 | 373, 930 |
| 欠驱动机械手 | 劣駆動マニピュレータ | 325 |
| 欠驱动模型 | 劣駆動モデル | 405 |
| 嵌入式处理器结构 | 組込み用プロセッサアーキテクチャ | 72 |
| 强化学习 | 強化学習 | 570, 573, 576, 582 |
| 桥梁喷涂机器人 | 橋梁塗装ロボット | 1013 |
| 切比雪夫连杆机构 | チェビシェフリンク機構 | 434 |
| 切换函数 | 切替え関数 | 322 |
| 亲和性 | 親和性 | 824 |
| 氢气吸留合金驱动器 | 水素吸蔵合金アクチュエータ | 167 |
| 倾斜组成材料 | 傾斜組成材料 | 222 |
| 清扫机器人 | 清掃ロボット | 1021 |
| 球关节 | 球ジョイント, ボールジョイント | 17, 204 |
| 球罐检查机器人 | 球形貯槽検査ロボット | 1026 |
| 球形步行机器人 | 球面歩行ロボット | 1026 |
| 球形车轮 | 球形車輪 | 376 |
| 区域分割 | 領域分割法 | 487 |
| 曲柄滑块机构 | スライダクランク機構 | 202 |
| 驱动轮速度控制 | 駆動輪速度制御 | 758 |
| 驱动器 | アクチュエータ | 136 |
| 躯干 | 体幹 | 227 |
| 躯体结构 | 胴体機構 | 436 |
| 取料机器人 | 取出しロボット | 933 |
| 取水管道清扫机器人 | 取水路清掃ロボット | 1026 |
| 去毛刺系统 | ばり取りシステム | 950 |
| 权函数 | 重み関数 | 55 |
| 权图 | 重み付きグラフ | 38 |
| 全方位视觉传感器 | 全方位视觉センサ | 499, 500 |
| 全双工模式 | 全二重モード | 79 |
| 群体机器人系统 | 群ロボットシステム | 788 |
| 群体智能 | 群知能 | 788 |
| R 燃料电池 | 燃料電池 | 190 |
| 扰动 | 外乱 | 53 |
| 热敏电阻 | サーミスタ | 129 |
| 人-机器人共存系统 | 人間-ロボット共存システム | 817 |
| 人工关节 | 人工関節 | 892 |
| 人工肌肉 | 人工筋肉 | 897 |
| 人工势场 | 人工ポテンシャル | 592 |
| 人工视觉 | 人工視覚 | 890 |
| 人工视网膜传感器 | 人工視網膜センサ | 101 |
| 人工手研究会 | 人工の手研究会 | 9 |
| *人工膝关节 | 膝継手 | 882 |
| 人工心脏 | 人工心臓 | 885 |
| 人工智能 | 人工知能 | 564 |
| 人工中耳 | 人工中耳 | 888 |
| 人机工程学 | 人間工学 | 905 |
| 人机交互界面 | マンマシンインタフェース | 907 |
| 人机界面 | インタフェース, ヒューマンロボットインタラクション | 730 |
| 人机系统 | マンマシンシステム | 908 |
| 人类行动模式 | 人間の行動モード | 810 |
| 人模型 | ヒューマンモデル | 731 |
| 人体测量 | 人体計測 | 907 |
| 人体机械论 | 人間機械論 | 8 |
| 人为错误 | ヒューマン・エラー | 810 |

- | | | |
|-----------------|-----------------------|----------|
| 认知系统 | 認知システム | 810 |
| 认知心理学 | 認知心理学 | 810 |
| 任务程序编制 | タスクプログラミング | 923 |
| 任务规划系统 | 作業計画システム | 658 |
| 任务描述 | 作業記述 | 659 |
| 日本机器人工业会 | 日本ロボット工業会 | 9 |
| 日本机器鼠大会 | 全日本マイクロマウス大会 | 1092 |
| 日常生活支持 | 生活支援 | 892 |
| 冗余度 | 冗長度 | 356 |
| 冗余手臂的控制 | 冗長アームの制御 | 281 |
| 冗余自由度 | 冗長自由度 | 17,231 |
| 冗余自由度手臂 | 冗長自由度アーム | 244 |
| 容错性设计 | フォールトトレランス設計 | 806 |
| 柔软手爪 | ソフトグリップ | 348 |
| 柔顺控制 | コンプライアンス動作,コンプライアンス制御 | 283,287 |
| 柔性臂 | フレキシブルアームの力学 | 298 |
| 柔性臂的控制 | フレキシブルアームの制御 | 305 |
| 柔性臂的逆动力学 | フレキシブルアームの逆动力学 | 304 |
| 柔性微驱动器 | フレキシブルマイクロアクチュエータ | 164 |
| 蠕动 | インチワーム | 158 |
| 蠕动式管内移动机器人 | インチワーム式管内走行ロボット | 873 |
| 软计算 | ソフトコンピューティション | 576 |
| 软件伺服 | ソフトウェアサーボ | 271 |
| 软驱动器 | ソフトアクチュエータ | 153 |
| 若当形式 | ジョルダン形式 | 21 |
| S 三腿支撑步态 | トライポッド歩容 | 444 |
| 三维成像 | 3次元イメージング | 1039 |
| 三维单元机械 | 3次元ユニット機構 | 785 |
| 三维蛇形机器人 | 3次元ヘビ型ロボット | 451 |
| 三维视觉传感器 | 3次元視覚センサ | 102 |
| 三维图形学 | 3次元グラフィックス | 689 |
| 三维位置测量系统 | 3次元位置計測システム | 1040 |
| 三维形状的表达 | 3次元形状の表現 | 684 |
| 三眼视觉 | 3眼ステレオ | 103 |
| 上肢康复训练系统 | 上肢リハビリ訓練システム | 172 |
| 蛇形机器人 | ヘビ型ロボット | 450,1061 |
| 设施设计 | ファシリティーズデザイン | 911 |
| 射流管伺服阀 | 噴射管方式サーボ弁 | 148 |
| 身体的诱导 | 身体的引き込み | 851 |
| 神经末梢 | 神経終末 | 104 |
| 神经网络 | ニューラルネットワーク | 577 |
| 神经元 | ニューロン | 579 |
| 神经元计算 | ニューロコンピューティング | 576,578 |
| 生产工序 | 生産工程 | 909 |
| 生产率的概念 | 生産性概念 | 905 |
| 生物材料 | 生物材料 | 214 |
| 生物传感器 | バイオセンサ | 127 |
| 生物微操作手 | バイオマイクロマニピュレーション | 866 |
| 生物学试验 | 生物学的試験 | 890 |
| 生物学条件 | 生物学的条件 | 892 |
| 声音传感器 | 音響感覚センサ | 127 |
| 圣女果采摘机器人 | ミニトマト収穫ロボット | 996 |
| 失效保护 | フェールセーフ | 987 |
| 湿度传感器 | 湿度センサ | 129 |
| 石油生产设施防灾机器人 | 石油生産施設防災ロボット | 1067 |
| 时间延迟问题 | 時間遅れ問題 | 712 |
| 实欧几里得空间 | 実ユークリッド空間 | 23 |

- | | | |
|-----------|-------------------|------------|
| 实时处理 | 実時間処理 | 74 |
| 实时仿真 | リアルタイムシミュレーション | 691 |
| 实时控制 | リアルタイム制御 | 73 |
| 实时视觉 | リアルタイムビジョン | 501 |
| 实时性 | リアルタイム性 | 779 |
| 实体模型 | ソリッドモデル | 686 |
| 实向量空间 | 実ベクトル空間 | 19 |
| 实质性定义 | 実質の定義 | 6 |
| 史都华平台 | スチュワートプラットフォーム | 292 |
| 使能装置 | イネーブル装置 | 991 |
| 示教程序编制 | 教示プログラミング | 923 |
| 示教 | 教示 | 666 |
| 示教再现方式 | 教示再生方法 | 656 |
| 示教再现装置 | プレイバックユニット | 629 |
| 世界坐标系 | ワールド座標系 | 17 |
| 事件驱动 | インベットドリブン | 760 |
| 试探 | ヒューリスティックス | 522, 564 |
| 试探的行动规划 | 発見的動作計画 | 588 |
| 视觉体 | ビューボリューム | 689 |
| 视觉/触觉融合控制 | 視触覚融合制御 | 558 |
| 视觉传感器 | 視覚センサ | 16, 86, 99 |
| 视觉代偿 | 視覚代償 | 890 |
| 视觉反馈控制 | 視覚フィードバック制御 | 553 |
| 视觉输入装置 | 視覚入力装置 | 478 |
| 视觉伺服方法 | 視覚サーボ法 | 554 |
| 视觉细胞 | 視覚細胞 | 99 |
| 视觉芯片 | ビジョンチップ | 502 |
| 视觉信息处理 | 視覚情報処理 | 697 |
| 视觉信息识别 | 視覚情報認識 | 477 |
| 视网膜 | 網膜 | 99 |
| 适应控制 | 適応制御 | 155 |
| 室外导航 | 屋外ナビゲーション | 616 |
| 手臂的控制 | アームの制御 | 270 |
| 手臂机构 | アームの機構 | 230 |
| 手臂力学 | アームの力学 | 256 |
| 手臂运动学 | アームの運動学 | 235 |
| 手部 | ハンド | 344 |
| 手部负载 | 手先負荷 | 644 |
| 手工作业 | 手作業 | 905 |
| 手界界面 | ジェスチャインタフェース | 734 |
| 手术支援机器人 | 手術支援ロボット | 1039 |
| 手形电动假手 | ハンド型電動義手 | 884 |
| 手眼系统 | ハンドアイシステム | 692 |
| 手掌抓握 | 手掌性把握 | 847 |
| 手指 | フィンガ | 344 |
| 手指的力学及运动学 | 指の力学・運動学 | 352 |
| 手指抓握 | 手指性把握 | 847 |
| 手爪 | グリップ | 345 |
| 输送管道检查机器人 | コンベクションチューブ検査ロボット | 1027 |
| 树 | 木 | 38 |
| 树状结构的连杆机构 | 木結構リンク機構 | 268 |
| 数乘积 | スカラ積 | 25 |
| 数据传输方式 | データ伝送方式 | 79 |
| 数据传输模式 | データ伝送モード | 79 |
| 数据链路层 | データリンク層 | 80 |
| 数控机床 | 数値制御工作機械 | 9 |
| 数学公式处理 | 数式処理 | 680 |

数学公式优化	数式の最適化	681
数值流体解析	数值流体解析	888
数字传输	ディジタル伝送	78
数字控制阀	ディジタル制御弁	154
数字控制	数值制御	14
数字信号	ディジタル信号	78
双臂平衡两轮车	腕振りバランス二車輪	1015
双臂作业平台	双腕作業プラットフォーム	1072
双点轴尖轴承型	ダブルピボット型	887
双极约束	エビポーラ拘束	491
双卡盘手部	ダブルチャックハンド	939
双轮差速方式	2 輪速度差方式	373
双轮独立驱动方式	独立 2 輪駆動型	374
双线性插值法	双 1 次補間法	484
双向控制	バイラテラル制御	14,705
双压电晶片	バイモルフ	158
双语法	ユニグラム	515
双足步行机器人的力学	2 脚歩行ロボットの力学	408
双足步行机器人的运动学	2 脚歩行ロボットの運動学	412
双足机器人	2 脚ロボット	403
双足机器人的控制	2 脚ロボットの制御	416
双足跳跃	バウンド歩容	440
水底行走式	水底走行式	456
水平多关节机器人	水平多関節ロボット	955
水下航行机器人	水中航行ロボット	1069
水下机器人	水中ロボット	454, 1072
水下搜索机器人	水中探索ロボット	1058
瞬心	瞬間中心	43
瞬心位置曲线	極位置曲線	44
丝杠—螺母系统	スクリューナットシステム	200
斯坦福全方位车轮	スタンフォード全方向車輪	377
死锁	デッドロック	779
四叉树	4 分木, カドツリー	686
四连杆机构的人工膝关节	4 節リンク機構膝継手	882
四足 6 轮式移动装置	4 脚 6 車輪型移動装置	448
四足机器人	4 脚ロボット	440
伺服部	サーボ部	16
伺服传感器	サーボセンサ	90
伺服阀	サーボ弁	148
伺服驱动	サーボ駆動	935
伺服驱动器	サーボドライバ	651
伺服系统	サーボ系	650
伺服型机械手	サーボマニピュレータ	709
搜索与扫描规划技术	探索・掃引計画技術	791
速度控制	速度制御	274
速度控制系统	速度制御系	773
速度瞬心	速度極	43
速率陀螺仪	レートジャイロ	97
塑料穿透焊接	プラスチック透過溶接レーザ装置	944
算法	アルゴリズム	53
算法理论的行动规划	アルゴリズム論的動作計画	584
随机采样	ランダムサンプリング	497
缩放比例法	スケーリング法	70
缩放机构	パンタグラフ機構	434
太阳能电池	太陽電池	192
泰勒展开	テイラー展開	21
弹性阻尼模型	ばね・ダンパモデル	675

探雷机器人	地雷探知ロボット	1083
探雷排雷机器人	地雷探知・除去ロボット	1082
套筒滚子链	ローラチェーン	201
套针	トロッカ	1042
特定说话者	特定話者	524
特殊减速机构	特殊減速機構	203
特殊末端执行器	特殊エンドエフェクタ	346
特殊驱动器	特殊アクチュエータ	157
特殊手部	特殊バンド	344
特殊手指机构	特殊指機構	348
特殊移动	特殊移動	15
特征方程	特性方程式	60
特征向量	固有ベクトル	21
特征值	固有値	19,305
特种传感器	特殊センサ	128
踢腿动作	蹴り動作	415
体节躯干型移动机器人	節体幹型移動ロボット	449
体系结构	アーキテクチャ	755
天体导航	天測航法	464
跳跃	跳躍	431
跳跃步态	プロンク歩容	440
跳跃机器人	ホッピングロボット	409
听觉传感器	聴覚センサ	126
听觉再现技术	聴覚ディスプレイ	722
通风管道检查机器人	ダクト内観察ロボット	1068
通信方式	通信方式	741
通信及信息处理设计	通信・情報処理設計	777
通信接口	通信インタフェース	630
通信模型	通信モデル	778
通信系统	通信システム	740
通信协议	通信プロトコル	79
通用化设计	ユニバーサルデザイン	1047
通用手部	ユニバーサルハンド	344
同步带	タイミングベルト	201
同步器	シンクロ	93
同步	同期	777
同构机器人	均質型ロボット	784
同伦	ホモトープ	35
同轴双轮车	平行2輪車	375
统计语音模型	統計的言語モデル	512
痛觉传感器	痛覚センサ	129
投影变换	投影変換	689
投影空间	射影空間	34
投影	射影	24
透明机械手	シースルー型マニピュレータ	737
凸轮机构	カム機構	203
突然变异	突然変異	580
图集	アトラス	33
图论	グラフ理論	36
图像识别	画像認識	965
图像噪声	画像ノイズ	482
涂布	デイスペンス	965
土质机械学	テラメカニクス	374
推测导航	推測航法	464
推力球轴承	スラスト玉軸受	205
腿部机构	脚機構	434
腿部可动范围	脚可動範囲	431

腿	脚	15
腿相位	脚位相	431
腿足式机器人	脚型ロボット	1063
退角	背離角	400
陀螺传感器	ジャイロセンサ	97
陀螺力矩	ジャイロモーメント	49
拓扑空间	位相空間	32
W 外传感器	外界(計測)センサ	99
外骨骼结构	外骨骼構造	765
外骨骼结构手臂	外骨骼構造型アーム	846
外观法	アスペクトル法	542
外积	外積	25
外壳语言	シェル言語	74
弯扭复合振动系统	曲げ・ねじり連成振動系	301
完整全方位移动机构	ボロノミック全方向移動機構	374
万向车轮	ユニバーサルホイール	377
万向联轴节	ユニバーサルジョイント	204
网格地图	グリットマップ	610
网格法	格子法	590
网络层	ネットワーク層	80
网络文法	ネットワーク文法	512
危险分析	危険解析	813
微波供电方式	マイクロ波方式	185
微操作	マイクロマニピュレーション	863
微操作机械手	マイクロマニピュレータ	703
微传感器	マイクロセンサ	862
微创伤外科手术	低侵襲外科手術	1042
微导管	マイクロカテーテル	872
微动机器人	マイクロ移動ロボット	873
微粉煤管内壁检查机器人	微粉炭管内面検査ロボット	1026
微工厂	マイクロファクトリー	874
微机器人系统	マイクロロボットシステム	872
微机器人学	マイクロロボティクス	857
微驱动器	マイクロアクチュエータ	857
微生物传感器	微生物センサ	130
微型传感器	マイクロセンサ	130
微型光镊	光マイクロピンセット	861
微型开关	マイクロスイッチ	91
维特比算法	ビタビアルゴリズム	514
卫星导航	衛星航法	464
伪逆矩阵	擬似逆行列	281
伪向量	擬似ベクトル	237
位置/姿态信息示教方法	位置・姿勢情報の教示法	631
位置传感器	位置センサ	90
位置估计	位置推定	397
位置控制	位置制御	773
位置确认	位置確認	617
位置	位置	42, 238
位置向量	位置ベクトル	27, 241
位置姿态数据	位置姿勢データ	661
味觉传感器	味覚センサ	127
温度传感器	温度センサ	129
文本分析	テキスト解析	518
纹理的特征	テクスチャ特徴	489
稳定性	安定性	55, 822
稳定性评价标准	安定性評価基準	437
稳定余量	安定余裕	437

稳定把握	安定把握	364
问题树的探索	問題木の探索	566
涡轮蜗杆	ウォームギア	199
沃洛诺伊图	ボロノイ図	585
无教师的学习	教師なし学習	570
无人搬运车	無人搬運車, 自動搬送車	373, 668
无人飞机	カイトプレーン	465
无人潜器	無索機	1072
无刷旋转变压器	ブラシレスレゾルバ	93
无线	無線	742
无线遥控建筑机械	ラジコン建機	1013
无向图	無向グラフ	36
无障碍设计	バリアフリーデザイン	1047
物理层	物理層	80
物料搬运	マテリアルハンドリング	933
物体识别	物体認識	537
物性信息识别	物性情報認識	538
误差	誤差	332
误差反向传播法	誤差逆伝播法	570
误差分析	誤差解析	642
X 希耳伯特空间	ヒルベルト空間	23
系统辨识	システム同定	67
系统化技术	システム化技術	927
系统维护机器人	システム保全ロボット	1068
下水管道检查机器人	下水道管渠健全度ロボット	1027
纤维强化树脂	繊維強化樹脂	762
纤维增强塑料	繊維強化プラスチック	211
显微手术	マイクロサージェリー	1041
显微手术机器人	マイクロサージェリーロボット	1043
线性规划法	線形計画法	70
线性驱动	リニア駆動	141
线性系统	線形システム	54
线性映射	線形写像	23
线性预测分析法(LPC分析)	線性予測分析法(LPC分析)	522
线性预测分析合成方法	線性予測分析合成方式	517
线性子空间	線形部分空間	30
线状谱对分析法	線スペクトル対分析法	522
详细信息收集机器人	詳細情報収集ロボット	1070
相对阶次	相対次数	59
相对运动	相対運動	41, 252
相似型主手臂	相似型マスタアーム	848
相位调制	位相変調	79
相位轨迹	位相軌道	41
相位平面	位相平面	41
相位特性	位相特性	58
相位余量	位相余裕	64
响应性	応答性	330
向量地图	ベクターマップ	610, 613
向量空间	ベクトル空間	22
象征	表象	734
像散法	非点収差法	119
像素存取	画素アクセス	480
橡胶驱动器	ラバアクチュエータ	162
橡胶人工肌肉驱动器	ゴム人工筋アクチュエータ	153
消防机器人	消防ロボット	1057
小波变换	ウェーブレット変換	485, 486, 490
小型手部	コンパクトハンド	297

小型维护作业机器人	メンテナンス作業用小型ロボット	1028
协调控制	協調制御	305
协议	プロトコル	79
斜齿轮	はす歯歯車	198
斜行角	側行角	431
谐波减速器	ハーモニック減速機構	204
芯片键合	ダイボンディング	964
信号传输方式	信号伝達形式	78
信息终端机器人	情報端末型ロボット	1016
行程	ストローク	431
行动规划问题	動作計画問題	584
行动控制体系	行動制御アーキテクチャ	1018
行驶阻力	走行抵抗	390
行为理解	行動理解	550
行星齿轮式减速机构	遊星歯車式減速機構	203
行星机器人	惑星ロボット	1077
行走方式	走行方式	930
行走环境识别	走行環境認識	616
形状处理	形状処理	687
形状记忆合金微驱动器	形状記憶合金アクチュエータ	860
形状记忆合金	形状記憶合金	160
形状特征	形状特徴	686
胸鳍型水下机器人	胸びれ型水中ロボット	459
修复时间	修復時間	804
虚功	仮想仕事	50
虚拟现实	バーチャルリアリティ, テレプレゼンス	732, 1078
蓄能器	アキュムレータ	180
嗅觉传感器	嗅覚センサ	128
旋进运动	歳差運動	49
旋量	ツイスト	350
旋转半径	旋回半径	402
旋转编码器	ロータリエンコーダ	93
旋转变压器	レゾルバ	92
旋转步态	旋回歩容	442
旋转关节型腿脚	回転関節型腿	403
旋转	回転	237
旋转运动	回転運動	231
薛尔瓦斯特准则	シルベスタの判定条件	21
学习控制	学習制御	66, 318
循环轨道	無限軌道	399
循环码	チェーンコード	489
Y 压电阻型压力微传感器	ピエゾ抵抗型センサ	863
压电复合材料	圧電複合材料	222
压电晶片堆	ピエゾスタック	158
压电驱动器	圧電アクチュエータ	157
压电元件	ピエゾ素子	157
压觉传感器	圧覚センサ	87, 105
压力角	圧力角	46, 199
压力控制阀	圧力制御弁	180
压力微传感器	圧力センサ	863
雅可比矩阵	ヤコビ行列	244
烟囱检查机器人	煙突点検ロボット	1026
烟囱清扫机器人	煙突清掃ロボット	1027
演示示教	実演教示	666
遥控操作	テレオペレーション	14
遥控机器人学	テレロボティクス	710, 1078
遥控机械手系统	マニピュレータ型遠隔操作システム	1071

- | | | |
|-------------|------------------------|-------------------|
| 遥控脑 | リモートブレイン | 654 |
| 遥控示教法 | リモートティーチ法 | 632 |
| 液压泵 | 油圧ポンプ | 179 |
| 液压驱动机器人 | 油圧駆動ロボット | 179 |
| 液压驱动器 | 油圧アクチュエータ | 147 |
| 液压伺服马达 | 油圧サーボモータ | 150 |
| 液压伺服系统 | 油圧サーボロボット | 148 |
| 液压 | 油圧 | 202 |
| 一次电池 | 1次電池 | 187 |
| 医疗机器人 | 医療用ロボット | 1038 |
| 医疗用微机械 | 医療用マイクロマシン | 873 |
| 移动插补功能 | 移動補間機能 | 661 |
| 移动功率 | 移動仕事率 | 432 |
| 移动功能 | 移動機能 | 15 |
| 移动关节型腿脚 | 直動関節型脚 | 403 |
| 移动关节 | 直動ジョイント, 直動関節, 直進ジョイント | 17, 206, 230, 238 |
| 移动机构 | 移動機構 | 227 |
| 移动机器人编程 | 移動ロボットのプログラミング | 668 |
| 移动机器人的动力源 | 移動ロボットの動力源 | 183 |
| 移动机器人 | 移動ロボット | 15 |
| 移动立体视觉 | 移動ステレオ | 500 |
| 移动体的回避 | 移動体の回避 | 619 |
| 移动坐标系 | 移動座標系 | 243 |
| 舰装机器人系统 | 艦装ロボットシステム | 962 |
| 异构机器人 | 不均質型ロボット | 784 |
| 异构主从机械手 | 異構造型マスタ・スレーブマニピュレータ | 709 |
| 译码器 | デコーダ | 515 |
| 意义尺度法 | 意味尺度法 | 825 |
| 翼边结构 | ウィングドエンジ構造 | 685 |
| 音素(电话)方式 | 音素(トライフォン)方式 | 521 |
| 音响模型 | 音響モデル | 512, 513 |
| 引导方式 | 誘導方式 | 929 |
| 引线键合 | ワイヤボンディング | 966 |
| 隐藏 | オクルージョン | 492 |
| 隐藏面和隐藏线消除 | 隠面隠線消去 | 689 |
| 隐式马尔可夫模型 | 隠れマルコフモデル | 513 |
| 应变块方式 | ひずみブロック方式 | 113 |
| 应变微传感器 | ひずみセンサ | 862 |
| 应变仪 | ストレインゲージ | 112 |
| 应用层 | アプリケーション層 | 80 |
| 映射 | 写像 | 248 |
| 硬度检测传感器 | 硬さ検出センサ | 540 |
| 泳式管内移动机器人 | 遊泳型管内走行ロボット | 873 |
| 用户接口 | ユーザインタフェース | 664 |
| 用连杆机构生成直线运动 | 直線運動生成リンク機構 | 203 |
| 优先级 | 優先度 | 77 |
| 有教师的学习 | 教師あり学習 | 570 |
| 有限元法 | 有限要素法 | 298 |
| 有限状态自动机 | 有限状態オートマトン | 512 |
| 有向图 | 有向グラフ | 37 |
| 酉阵 | ユニタリ行列 | 22 |
| 诱导轮 | 遊動輪 | 400 |
| 诱导 | 引込み | 735 |
| 余子式 | 小行列式 | 19 |
| 鱼尾鳍形水下机器人 | ウナギ形水中ロボット | 458 |
| 娱乐机器人 | アミューズメント型ロボット | 1015 |
| 与人协调的智能 | 人間との協調知能 | 726 |

与人协作共存型机器人	人間協調・共存型ロボットシステム	10
语调成分	話調成分	520
语言处理系统	言語処理系	74
语言模型	言語モデル	515
语音传感器	音声センサ	126
语音的特征提取	音声の特徴抽出	513
语音合成单元	音声合成単位	521
语音合成方式	音声合成方式	517
语音合成	音声合成	516
语音理解	音声理解	525
语音频谱包络	音声のスペクトル包絡	522
语音识别	音声認識	512
语音通信	バーバルコミュニケーション	523
语音信号处理	音声信号処理	521
语音信息处理	音声情報処理	512
语音应用系统	音聲応用システム	523
语音中间软件	音声ミドルウェア	527
育苗机器人	苗生産ロボット	997
原地旋转	ピボットターン, 信地旋回	402
原子力显微镜	原子間力顕微鏡	874
圆柱关节	円筒ジョイント	17
圆柱滚子轴承	円筒ころ軸受	205
圆柱坐标机器人	円筒座標ロボット	922
远程检查维护行走式机械手	遠隔点検保守用走行マニピュレータ	1068
运动补偿	運動補償	414
运动传递机构	運動転達機構	198
运动的传递特性	運動伝達特性	46
运动定律	運動の法則	47
运动方程式	運動方程式	140
运动分析	運動解析	672
运动分析仿真	運動解析シミュレーション	672
运动副	対偶	17
运动规划	モーションプランニング	612, 841
运动控制	運動制御	270
运动群	運動群	251
运动势能	運動ポテンシャル	50
运动图像处理	動画像処理	496
运动系统的伺服控制	運動系のサーボ制御	649
运动学	運動学	695
运动学分析	運動学解析	235
运动意图	モーションマインド	918
运动约束	運動拘束	356
运动坐标系	運動座標系	27
运算放大器	演算増幅器	192
运行分析	稼働分析	917
运行控制	運行制御	976
韵律生成	韻律生成	518
韵律特征	韻律の特徴	517
Z 灾害救助机器人	災害救助ロボット	1061
灾害情报收集机器人	災害情報収集ロボット	1062
灾害应对机器人	災害対応ロボット	1057
再现表演机器人	再生パフォーマンス型ロボット	1018
在线编程	オンラインプログラミング	656
在线仿真	オンラインシミュレーション	691
噪声的消除	雑音の除去	515
增量式编码器	インクリメンタル型エンコーダ	93
增益定序控制系统	ゲインスケジューリング制御系	309

増益特性	ゲイン特性	58
増益余量	ゲイン余裕	64
粘性摩擦	粘性摩擦	260
占据地图	オキョパンシーマップ	610, 613
占空系数	デューティ比	430
张量分析	テンソル解析	22
照度差立体视觉	照度差ステレオ	500
侦察机器人	偵察ロボット	1058
真空吸盘手部	真空吸着バンド	346
振动陀螺仪	振動ジャイロ	97
振动抑制控制	振動抑制制御	300
振幅调制	振幅変調	79
振子机器人	振り子ロボット	922
正常活动范围	正常作業域	908
正定	正定	21
正动力学模型	順動力学モデル	258
正动力学	順動力学	266
正规正交基底向量	正規直交基底ベクトル	25
正交补空间	直交補空間	258
正运动学	順運動学	240
正则矩阵	正則行列	19
帧传送	フレームトランスファ	101
支撑腿	支持脚	408
支撑相	支持脚相	430
蜘蛛型机器人	リム型ロボット	1063
执行器级	エフェクタレベル	658
直齿圆柱齿轮	平歯車	198
直方图变换	ヒストグラフ変換	483
直方图均一化	ヒストグラフ均一化	483
直角坐标机器人	直角座標ロボット	922
直角坐标系圆弧插补	直角座標系円弧補間	660
直接示教法	ダイレクトティーチ法	631
直线编码器	リニアエンコーダ	93
直线导轨	リニアガイド	207
直线滚动轴承	リニアベアリング	207
直线型 DD 电机	リニア型 DD モータ	147
直线型电机	リニアモータ	145
指尖把握	指先把握	355
质点运动方程式	質点の運動方程式	47
质点	質点	41
质量管理	品質管理	905
质子射线断层成像法	陽電子射出断層撮影法	1039
治疗机器人	治療用ロボット	1040
秩	ランク	20
智力风暴	マインドストーム	1017
智能传感器	スマートセンサ	112
智能道路交通系统	高度道路交通システム	373
智能机器人	知能ロボット	15
智能假腿	インテリジェント太腿義足	882
智能空间	インテリジェントスペース	796
智能数据载体	知的データキャリア	793
智能体	エージェント	781
智能移动机器人	知能移動ロボット	930
智能远程作业系统	知的遠隔作業システム	723
智能制造系统	知的生産システム	507
中断处理	割込み処理	77
中心窝视觉传感器	中心窩视觉センサ	499

- | | | |
|------------|--------------------|-------------|
| 重复控制 | 繰返し制御 | 66 |
| 重力方向传感器 | 重力方向センサ | 89 |
| 重力抓握 | 重力依存把握 | 847 |
| 重物搬运机器人 | 重量物運搬用ロボット | 1070 |
| 重音处理 | アクセント処理 | 519 |
| 肘式机构 | トグル機構 | 202 |
| 主从方式 | マスタ・スレーブ方式 | 705 |
| 主从机械手 | マスタ・スレーブマニピュレータ | 9,14 |
| 主动感知 | アクティブセンシング | 498,550 |
| 主动关节 | 能動関節 | 230 |
| 主动脚轮 | アクティブキャスタ | 378 |
| 主动接触型知觉 | 能動的ハプティクス知覚 | 539 |
| 主动立体图像再现方式 | 能動立体ディスプレイ | 721 |
| 主动柔顺控制 | 能動インピーダンス制御 | 285 |
| 主动视觉 | 能動視覚, アクティブビジョン | 498,499,500 |
| 主动视觉传感器 | アクティブセンサ | 103 |
| 主动型传感器 | 能動型センサ | 125 |
| 主动悬挂四轮移动机构 | アクティブサスペンション4輪移動機構 | 380 |
| 主动约束 | 能動拘束 | 360 |
| 主动自由度 | 能動自由度 | 235 |
| 主管道诊断机器人 | 主要配管診断ロボット | 1025 |
| 主脚 | マスタフット | 849 |
| 助力比 | アシスト比 | 821 |
| 助力外衣 | パワーアシストスーツ | 1053 |
| 助力系统 | パワーアシストシステム | 820 |
| 铸造 | 鋳造 | 933 |
| 抓握力控制 | 把握力制御 | 556 |
| 抓握系统 | 把握系 | 355 |
| 专用末端执行器 | 専用エンドエフェクタ | 344 |
| 转动关节 | 回転ジョイント, 回転関節 | 204,230,238 |
| 转动型 DD 电机 | 回転型 DD 用モータ | 146 |
| 转矩常数 | トルク定数 | 139 |
| 转矩控制 | トルク制御 | 396 |
| 转向 | 操舵 | 383 |
| 转向机构 | ステアリング機構 | 378 |
| 转向控制 | 操舵制御 | 396 |
| 转向力 | コーナリングフォース | 390 |
| 转置矩阵 | 転置行列 | 19 |
| 转子 | ロータ | 137 |
| 装具 | 装具 | 1047 |
| 装配 | 組立て | 954 |
| 装配机器人 | 組立て用ロボット | 955 |
| 装卸方式 | 移載方式 | 930 |
| 状态变量 | 状態変数 | 56 |
| 状态反馈控制规则 | 状態フィードバック則 | 60 |
| 状态方程 | 状態方程式 | 55 |
| 状态空间法 | 状態空間法 | 60 |
| 状态类似度 | 状態類似度 | 598 |
| 椎体 | 錐体 | 99 |
| 准动态步行 | 準動歩行 | 431 |
| 着地模型 | 着地モデル | 411 |
| 姿态传感器 | 姿勢センサ | 89,97 |
| 姿态可重构机器人 | 姿勢可変型ロボット | 1028 |
| 姿势 | 姿勢 | 42,240 |
| 自动钓鱼装置 | カッオ自動釣り装置 | 1000 |
| 自动钓鱼机器人 | 自動イカ釣り機械 | 1001 |
| 自动航行系统 | 自動航行システム | 621 |

- | | | |
|-----------------|------------------|----------|
| 自动化 | オートメーション | 14 |
| 自动驾驶系统 | オートバイロット, 自動操縦装置 | 464 |
| 自动脱钩装置 | 自動玉掛け外し装置 | 1008 |
| 自动玩偶 | 自動人形 | 6 |
| 自立支援机器人 | 自立支援ロボット | 1049 |
| 自立 | 自立 | 1047 |
| 自适应步态 | 適応歩容 | 431 |
| 自适应控制 | 適応制御 | 66, 309 |
| 自适应鲁棒控制 | 適応ロバスト制御 | 312 |
| 自适应抓握控制 | 適応把握制御 | 557 |
| 自校正控制系统 | セルフチューニング制御系 | 66, 309 |
| 自行式雷达检查机 | 自走式レーダ調査機 | 1027 |
| 自旋旋转 | スピントーン | 402 |
| 自由度的退化 | 自由度の退化 | 231 |
| 自由度 | 自由度 | 17, 230 |
| 自由末梢 | 自由終末 | 104 |
| 自重构机器人 | 自己構造可変ロボット | 784 |
| 自主分布式群体机器人系统 | 自律分散型群ロボットシステム | 788 |
| 自主海洋机器人 | 自律型海中ロボット | 1072 |
| 自助器具 | 自助具 | 1047 |
| 纵向弹性模量 | 縦弾性係数 | 765 |
| 纵向面 | 矢状面 | 403 |
| 纵向稳定余量 | 縦安定余裕 | 431 |
| 纵型搜索 | 縦型探索 | 566 |
| 总线构成 | バス構成 | 72 |
| 阻抗控制 | インピーダンス制御 | 285, 980 |
| 阻尼控制 | ダンピング制御 | 288 |
| 组合体算法 | コンポジットボディ法 | 267 |
| 最大活动范围 | 最大作業域 | 908 |
| 最大静止转矩 | 静止最大トルク | 139 |
| 最大流量问题 | 最大フロー問題 | 39 |
| 最短路径问题 | 最短経路問題 | 39 |
| 最短时间控制 | 最短時間制御 | 315 |
| 最佳优先搜索 | 最良優先探索 | 566 |
| 最小二乘法 | 最小2乗法 | 548 |
| 最小费用流问题 | 最小費用フロー問題 | 39 |
| 最小均方 | 最小2乗法メディアン | 496 |
| 最优调节器 | 最適レギュレータ | 428 |
| 最优估计法 | 最尤推定法 | 548 |
| 最优控制理论 | 最適制御理論 | 313 |
| 作业功能 | 作業機能 | 327 |
| 作业规划 | 作業計画 | 594 |
| 作业机器人 | 作業ロボット | 1070 |
| 作业监视支援机器人 | 作業監視支援ロボット | 1070 |
| 作业示教法 | 作業教示法 | 631 |
| 作业研究 | 作業研究 | 901 |
| 作业坐标伺服 | 作業座標サーボ | 270 |
| 作业坐标系 | 作業座標系 | 235 |
| 作业坐标 | 作業座標 | 244 |
| 坐标变换 | 座標変換 | 24, 235 |
| 坐标系 | 座標系 | 235, 928 |
| 其他 | | |
| Aguarobo | アクアロボ | 457 |
| automaton | オートマトン | 3 |
| δ 机构手臂 | デルタアーム | 293 |
| Euler-Savary 公式 | オイラーサバリの式 | 45 |
| Gröbner 基底 | グレブナ基底 | 681 |
| HEXA 手臂 | ヘキサアーム | 293 |

KarelCapek	カレル・チャペック	3
Langevin 函数	ランジュバン関数	170
Mckibben 人工肌肉	マッキベン人工筋	163
Mechanum 车轮	メカナムホイール	377
Mercury 项目	マキュリープロジェクト	712
Pitch	ピッチング	17
R3	アールキューブ	720
Responsive Link	レスポンスリンク	78
Riccati 方程	リッカチ方程式	65
RoboCup 机器人比赛	ロボカップ	1094
ROBOCUP 救援机器人联盟	ロボカップレスキューロボットリーグ	1064
RoboFesta	ロボフェスタ	1094
Roller-Walker	ローラウォーカー	380
Roll	ローリング	17
SCARA 型机器人	スカラ型ロボット	232
Sylvester 定理	シルベスタの定理	365
Yaw	ヨーイング	17
2 个自由度伺服系统	2 自由度サーボ系	280
2 轮差动方式	2 輪速度差方式	930
2 轴变位机	2 軸ポジショナ	940
2 轴正交 MP 关节	2 軸直交 MP 関節	848
6 轴力觉传感器	6 軸力覚センサ	542
“无夹具”单元	治具レスセル	941

新學
平舟

PDG